

УДК 621.039.531/534

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ ЗАСЫПКИ ШАРОВЫХ ТВЭЛОВ НА БЛОКИ ГРАФИТОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В АКТИВНЫХ ЗОНАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

Цель проведенных исследований – отработка методологии оценки давления засыпки твэлов на отражатели активной зоны ВТГР, а также прогнозирование на ее основе давления в существующих проектах газоохлаждаемых реакторов. Изложен экспериментально-расчетный метод определения силового воздействия движущейся засыпки шаровых твэлов на блоки бокового отражателя реакторов ВТГР, основанный на физическом моделировании с использованием принципов теории подобия.

Получен большой объем экспериментально-расчетных данных по моделированию и определению бокового давления шаровых засыпок в активных зонах ВТГР. Анализ полученных данных и их аппроксимация позволили определить аналитические зависимости давления сыпучей среды на боковой отражатель, которые могут быть использованы в проектных расчетах реакторов. Проведено сравнение полученных результатов с данными зарубежных исследований.

Ключевые слова: механика сыпучих сред, силовое взаимодействие шаровой засыпки твэлов, отработка методологии оценки давления засыпки на блоки отражателя, формулы для оценки давления, распределение давления по высоте бункера.

Введение

При проектировании высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) с насыпной активной зоной в число стоящих перед разработчиками задач входит изучение силового взаимодействия шаровых твэлов с блоками графитовых отражателей в результате гравитационного бокового давления шаровой засыпки.

Механика сыпучих сред опирается на экспериментальные данные, позволяющие осветить физическую сторону явлений и процессов, происходящих в сыпучих телах, обосновать те или иные предпосылки и допущения. Следует иметь в виду, что только из опыта могут быть получены для разных сыпучих сред числовые значения физико-механических характеристик и констант, входящих в расчетные формулы. Значение опыта в механике сыпучих тел еще более велико, чем в других разделах механики, поскольку явления и процессы, происходящие в сыпучих телах, сложнее, чем в твердых или жидких, и при этом менее изучены. Это в полной мере относится к вопросам силового взаимодействия шаровой засыпки твэлов с графитовой кладкой реактора. Задача осложняется тем, что давление сыпучей среды необходимо определять, как в состоянии стационарного (устойчивого или упругого) равновесия, так и в состоянии движения засыпки твэлов в процессе ее рециркуляции. В то же время взаимодействие твэлов с кладкой отражателей представляет несомненный интерес с точки зрения прогнозирования износоустойчивости кладки, так как методики прогнозирования износа базируются на знании давления шаровых твэлов в точках касания с блоками кладки. Таким образом, определение давлений на кладку является актуальной задачей. Получение этой информации необходимо как с позиций теоретического прогнозирования износа, так и с позиций его экспериментального изучения методами физического моделирования.

Приведенные в работе 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

Для разработки методологии получения на стадии проектирования реакторов оценок величины бокового давления засыпки твэлов на блоки графитовых отражателей необходимо решение следующих задач:

- получение экспериментальных данных о распределении бокового давления на моделях активной зоны;
- анализ факторов, определяющих величину бокового давления;
- разработка зависимостей пересчета полученных данных на натурные условия различных проектов ВТГР.

Экспериментальные исследования бокового давления засыпки шаровых элементов

Задача экспериментального определения давления засыпки шаров на боковые стенки решалась на модели активной зоны ВГ-400 масштаба 1:3 и последующей аппроксимацией экспериментальных данных. В качестве модели активной зоны в масштабе 1:3 использовалась стальная емкость диаметром $D=2,13$ м с тремя разгрузочными каналами и 18 загрузочными шаропроводами, заполненная до уровня 1,7 м ($H/D=0,8$) стеклянными имитаторами шаровых твэлов диаметром $d_{ш}=0,02$ м в количестве ≈ 800 тыс. Коэффициент внутреннего трения засыпки составил $f_{вн}=0,36$, внешнего трения $f_{внеш}=0,3$. Насыпной удельный вес засыпки при пористости $\varepsilon=0,4$ составил $\gamma \approx 1080$ кг/м³.

Измерение горизонтальных усилий производилось с помощью тензодатчиков консольного типа, установленных на десяти воспринимающих давление измерительных площадках размером 0,1 м × 0,07 м, вставленных в боковой корпус модели попарно на пяти уровнях по высоте засыпки, начиная с $\Delta H=0,33$ м ($17d_{ш}$) до 0,98 м ($50 d_{ш}$) от ее свободного уровня. Для дистанционной синхронизированной фиксации давлений сигналы с тензодатчиков поступали на усилитель и на записывающие устройства, а с него на шлейфовый осциллограф.

Учитывая, что, по априори известным данным [1-5], боковое давление в статическом положении сыпучей среды существенно отличается от давления при выпуске ее из бункера, измерения проводились как в процессе стартового заполнения модели шарами, так и в процессе рециркуляции шаровой засыпки с расходом 2-3 шара в секунду через каждый из трех выгрузных каналов. В периоды стартовых загрузок активной зоны и в промежутках между циклами загрузки – выгрузки твэл на отражатели действуют статические нагрузки. В период их рециркуляции засыпка в основной своей массе медленно движется, со скоростями, определяемыми темпом выгрузки твэлов и местоположением их в объеме а.з. (для ВГ-400 средняя скорость оседания засыпки $\approx 0,0000125$ м/с). Измерения при стартовом заполнении модели производились с шагом $\Delta H=0,1$ м и 0,17 м от каждого из пяти уровней расположения датчиков. Усреднение получаемых данных производилось по показаниям со всех датчиков для каждого фиксированного уровня заполнения модели, а также по датчикам одного уровня. Измерения в движении производились с шагом 10 тыс. перегруженных шаров, что, согласно со скоростями шаров пристеночных слоев, приводило к их смещениям, достаточным для изменения ситуации на измерительных площадках. Измерения производились после предварительной перегрузки ≈ 1 объема засыпки (для стабилизации ее структуры и поля скоростей) в течение последующей рециркуляции еще одного объема засыпки. Усреднение производилось по показаниям датчиков одного уровня, полученным в течение времени рециркуляции.

Получаемые данные усреднялись также и по количеству повторных экспериментов, после отбраковки явно аномальных наблюдений, вызванных погрешностями в системе измерений.

Результаты исследований

В табл. 1 сведены усредненные экспериментальные значения горизонтального давления $\sigma_{z(cp)}$ в стационарном состоянии засыпки и при ее движении. Здесь же представлены среднеквадратическое отклонение \sqrt{S} и выборка максимальных (пиковых) значений давления $\sigma_{z(пик)}$, имевших место при рециркуляции, а также сведены расчетные значения $\sigma_{z(cp)}$ для различных проектов ВТГР и опубликованные данные по реактору ТНТР-300 (ФРГ) [6].

Анализируя физический смысл исследуемого процесса, в основу теоретического вывода зависимости бокового давления от глубины ΔH (высоты слоя до уровня свободной поверхностью засыпки) может быть положено дифференциальное уравнение равновесия горизонтального дискообразного элемента сыпучей среды в бункере (1):

$$d\sigma_g = \left(\gamma - f_{внеш} n_\sigma \frac{\sigma_B}{\frac{S}{l}} \right) dH, \quad (1)$$

где σ_g и $d\sigma_g$ – давление столба сыпучей среды и приращение элемента слоя dH ; γ – насыпной вес сыпучей среды в данном элементе объема; $f_{внеш}$ – коэффициент внешнего трения сыпучего элемента; n_σ – коэффициент бокового давления, определяемый как отношение бокового давления σ_r к вертикальному σ_B ; $\frac{S}{l}$ – гидравлический радиус, определяемый как отношение площади поперечного сечения к периметру.

Интегрирование выражения (1) приводит к выражению, известному как формула Янссена для бункеров диаметром D (2):

$$\sigma_r = \frac{\gamma D}{4f_{внеш}} \left(1 - e^{-\frac{4n_\sigma f_{внеш} \Delta H}{D}} \right) \quad (2)$$

Таблица 1

Таблица экспериментальных значений горизонтального давления

	Эксперимент (М1:3)		Расчет (М 1:1)				ТНТР-300	
	Проект ВГ-400		НТР-10		ВГМ			
ΔH	H/D=0,8 D=107d _ш	H/D=0,8 D=107d _ш	H/D=1 D=30d _ш	H/D=3 D=50d _ш	H/D=0,8 D=93d _ш			
	d _ш =0,02м	d _ш =0,06м						
	γ = 1500 кг/м ³	γ = 1080 кг/м ³						
	Диапазоны f _{вн} / f _{внеш}							Диапазон f _{вн} = 0,13-0,6
	f _{вн} =0,36 / f _{внеш} =0,30	0,12 /	0,45 /	0,12 /	0,45 /	0,12 /	0,45 /	
		0,14	0,49	0,14	0,49	0,14	0,49	

Окончание табл. 1

					По формуле 4			По формуле 7				
	Статика	В движении										
	$\sigma_{z(ср)}$	$\sigma_{z(ср)}$	\sqrt{S}	$\sigma_{z(пик)}$	$\sigma_{z(ср)}$						$\sigma_{z(пик)}$	
x10кгс/см ²												
17d _ш	0,2	0,37	0,1	0,51	0,96	0,75	0,87	0,68	0,93	0,67	0,86	3,34
25d _ш	0,29	0,61	0,16	0,87	1,58	1,24	1,43	1,12	1,34	0,9	1,35	3,92
33d _ш	0,34	0,79	0,24	1,19	2,05	1,6	1,86	1,45	1,72	1,07	1,87	4,59
42d _ш	0,49	0,97	0,27	1,42	2,53	1,97	-	-	2,06	1,2	2,39	5,16
50d _ш	0,53	1,05	0,27	1,51	2,73	2,13	-	-	2,37	1,31	2,64	5,64
58d _ш	-	-	-	-	-	-	-	-	2,66	1,39	2,64	5,45
67d _ш	-	-	-	-	-	-	-	-	2,92	1,45	2,28	4,6
75d _ш	-	-	-	-	-	-	-	-	3,17	1,5	-	-
147d _ш	-	-	-	-	-	-	-	-	7,5	4,5	-	-

Следует отметить, что вывод формулы (2) основан на следующих допущениях:

- вертикальное давление σ_r на любой глубине ΔH принимается равномерно распределенным (или усредненным) по всей площади S горизонтального сечения;
- горизонтальное давление – σ_r . в любой точке сыпучей среды, в том числе и у стенок бункера, принимается пропорциональным вертикальному давлению по всей глубине бункера, то есть $n_\sigma = \text{const}$;
- значение коэффициента внешнего трения о стенки бункера $f_{\text{внеш}} = \text{const}$;
- по всей глубине;
- влияние днища не учитывается, т.е. засыпка принимается неограниченной по глубине.

Коэффициент бокового давления n_σ вычисляется по ряду соотношений, наиболее обоснованным является $n_\sigma = \frac{1 - \sin \varphi_{\text{вн}}}{1 + \sin \varphi_{\text{вн}}}$, называемый коэффициентом подвижности [1, 7], где $\varphi_{\text{вн}}$ – угол внутреннего трения засыпки.

Анализ структуры формулы Янссона, выведенной для статического положения неограниченной по высоте засыпки, показывает, что при увеличении ΔH давление на стенку должно монотонно и медленно возрастать, приближаясь к максимуму (3):

$$\sigma_r = \frac{\gamma D}{4f_{\text{внеш}}} \quad (3)$$

Однако, уже с глубины ΔH , соответствующей $\Delta H/D \cong 6$, горизонтальное давление практически не растет. Это означает, что при глубинах с $\Delta H/D > 6$ давление на стенки не зависит от высоты выше лежащего слоя и силы внешнего трения сыпучего материала компенсируют вес вновь загружаемого материала. Для мелких бункеров с $H/D \leq 1$ (реакторы типа ВГ-400, НТР-10, ТНТР-300) зависимость σ_r от ΔH , рассчитанная по формуле (2), практически линейна. Следует также отметить, что на малых глубинах величина бокового давления слабо зависит от диаметра бункера и внешнего трения, однако в соответствии с (3) максимальное давления на больших глубинах находится от D в прямой, а от $f_{\text{внеш}}$ в обратно пропорциональной зависимости.

На рис. 1 (линия 1) видно, что полученные экспериментальные зависимости бокового давления в статическом положении засыпки достаточно хорошо согласуется с расчетами по теоретической формуле Янссена (2) (линия 2).

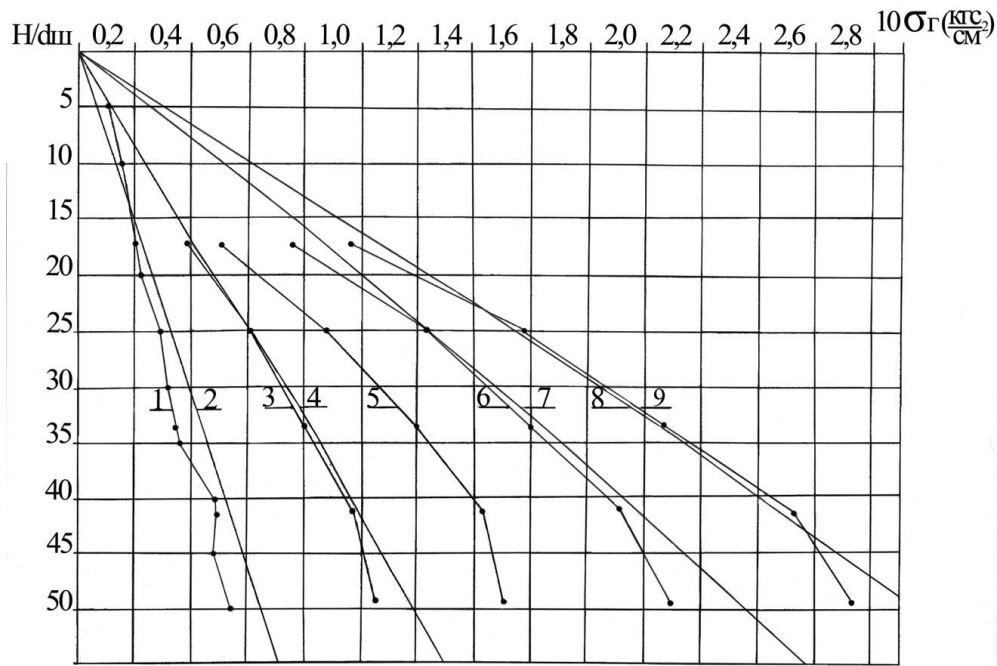


Рис. 1. Распределение бокового давления по высоте шаровой засыпки:
 линии 1,3,5 – эксперимент на модели М1:3, линия 2 – расчет по формуле Янссена (2),
 линии 4,7,9 – расчет по формуле (4), линии 6,8 – расчет по формуле (5)

Однако при движении твэлов боковое давление резко возрастает (линия 3) в среднем в 2,05 раза, и в данном случае формула Янссена в форме (2) уже не работает. Единого мнения, объясняющего этот эффект, среди исследователей нет. Вместе с тем, принимая за основу (2), единственным фактором, способным значительно увеличить боковое давление в слоях засыпки с $H/D \leq 3$, является увеличение коэффициента бокового давления n_{δ} , непосредственно связанного с коэффициентом внутреннего трения $f_{вн}$. В экспериментах по изучению трения [3] было однозначно установлено при переходе засыпки шариков из состояния покоя в состояние движения внешнее трение частично переходит от трения скольжения к трению качения, понижая коэффициент $f_{внеш}$ в 3-4 раза. Можно предположить, что и в глубине засыпки (в зонах сдвига) может наблюдаться тот же эффект, понижающий коэффициент $f_{вн}$. Засыпка как бы частично «оживается», в результате чего давление на боковые поверхности увеличивается, смещаясь в сторону величины гидростатического давления, определяемого как $\gamma \Delta H$. Учитывая это, при расчетах σ_r по формуле (2) целесообразно принять пониженные значения коэффициента внешнего трения $f_{внеш}$ и угла внутреннего трения $\varphi_{вн}$. В результате получена зависимость (линия 4 на рис. 1), практически совпадающая с экспериментальными значениям σ_r при рециркуляции шаров. Адаптированная таким образом формула Янссена применительно к описанию движущейся засыпки приобретает вид (4):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\gamma D}{f_{внеш}} \left(1 - e^{-\frac{n_{\delta} f_{внеш} \Delta H}{D}} \right) \\ n_{\delta} &= \frac{1 - \sin(\arctan \frac{f_{вн}}{4})}{1 + \sin(\arctan \frac{f_{вн}}{4})} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Теоретической основой для пересчета результатов модельных испытаний является степенной закон, связывающий важнейшие параметры, от которых зависит величина бокового давления. В а.з. с глубиной $H/D \leq 3$ это, в первую очередь, масштаб модели М, удельный

насыпной вес засыпки γ , внутреннее и внешнее трение $f_{вн}$ и $f_{внеш}$. При экстраполяции модельных данных на другие проекты реакторов следует учитывать также и изменение диаметров этих реакторов. При этом формула пересчета примет вид (5):

$$\sigma_{\Gamma(p)} = \sigma_{\Gamma(m)} \left(\frac{M(p)}{M(m)} \right)^{\alpha=1} \left(\frac{\gamma(p)}{\gamma(m)} \right)^{\beta=1} \left(\frac{f_{вн(p)}}{f_{вн(m)}} \right)^{\delta=-0,107} \left(\frac{f_{внеш(p)}}{f_{внеш(m)}} \right)^{\theta=-0,077} \left(\frac{D_{p(2)}}{D_{p(1)}} \right)^{\vartheta=0,077} \quad (5)$$

где индексы (р) и (м) обозначают натурные и модельные значения сопоставляемых параметров; $\frac{D_{p(2)}}{D_{p(1)}}$ – соотношение диаметров модели и натурны (при условии, что диаметры D_{p1} и D_{p2} измеряются в диаметрах шаров $d_{ш}$, а используемые в реакторах р1 и р2 твэлы имеют одинаковый размер).

Показатели степени α и β принимаются, исходя из физического смысла, равными 1 (но, если прогнозируемый параметр имеет размерность силы, то $\alpha = 3$).

Показатели степени δ , θ , ϑ определяются по формулам (6):

$$\delta = \frac{\ln \frac{\sigma_{\Gamma(1)}}{\sigma_{\Gamma(2)}}}{\ln \frac{f_{вн(1)}}{f_{вн(2)}}}, \theta = \frac{\ln \frac{\sigma_{\Gamma(1)}}{\sigma_{\Gamma(2)}}}{\ln \frac{f_{внеш(1)}}{f_{внеш(2)}}}; \vartheta = \frac{\ln \frac{\sigma_{\Gamma(1)}}{\sigma_{\Gamma(2)}}}{\ln \frac{D_{p(1)}}{D_{p(2)}}} \quad (6)$$

где соотношение $\frac{\sigma_{p(1)}}{\sigma_{p(2)}}$ рассчитывается по формуле (4), для масштаба М1:1 и натурных значений входящих в нее параметров (γ , $f_{вн}$, $f_{внеш}$ и D). При этом берутся по два значения коэффициентов трения, охватывающих предполагаемый диапазон их значений в натурных условиях рециркуляции засыпки твэл.

Рекомендуемые значения показателей степени составили $\delta = -0,105$; $\theta = -0,077$; $\vartheta = 0,077$. В табл. 1 приведены результаты расчетов бокового давления по формуле (5) для предполагаемых диапазонов натурных значений коэффициентов трения в реакторах типа проектов ВГ-400 и НТР-10. На рис. 1 это линии 6 и 8. Здесь же изображены соответствующие им линии 7 и 9, рассчитанные по формулам (4). Как видно из графиков, линии 6 и 7, а также 8 и 9 практически совпадают до глубин $\Delta H = 45d_{ш}$. При этом зависимости роста давления с глубиной, рассчитанные по экспериментальным данным, имеют линейный характер. Ниже этой глубины начинает проявляться тенденция к снижению пропорционального прироста давления, что, по-видимому, связано с приближением этих слоев к зоне влияния выгрузных каналов. Аналогичные результаты (табл. 1) были получены и при проектировании реактора НТР-300 [6]: здесь увеличение бокового давления наблюдалось до уровня $\Delta H = 50d_{ш}$. Ниже происходит его снижение. Имеет место также хорошее совпадение и по абсолютным величинам давления: данные по $\sigma_{z(ср)}$ в зависимости от глубины слоя составляют 91-97 % от прогнозируемых для реактора ВГ-400. Следует также отметить, что представленные в табл. 1 и на рис. 1 результаты качественно хорошо согласуются с известными имеющимися данными о характере распределения бокового давления в мелких бункерах с $H/D \leq 1$.

В глубоких бункерах (с $H/D \gg 1$) типа а.з. модульного реактора ВГМ с $H/D = 3$ распределение бокового давления носит несколько иной характер. Связано это с тем, что основная масса сыпучего материала над уровнем $H/D \cong 1$ движется как единое целое за исключением зоны сдвига в пристеночных слоях с пониженным относительно стационарного состояния значением коэффициента внешнего трения. Поскольку при этом коэффициент внутреннего трения в большинстве объема не должен меняться, то и коэффициент бокового давления n_{σ} , входящий в формулу (4), остается равным стационарному положению засыпки. В результате для описания бокового давления до уровня $H/D \cong 1$ (для ВГМ это $\Delta H/D = 2$) можно предложить формулы (7):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\Gamma} &= \frac{\gamma D}{f_{\text{внеш}}} \left(1 - e^{-\frac{n_{\sigma} f_{\text{внеш}} \Delta H}{D}} \right) \\ n_{\sigma} &= \frac{1 - \sin(\arctan f_{\text{вн}})}{1 + \sin(\arctan f_{\text{вн}})} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В более глубоких слоях до уровней $H/D = 0,25-0,3$ рекомендуется пользоваться формулой (4). При этом максимальные оценки бокового давления в режиме рециркуляции твэлов в реакторе ВГМ будут ожидать на глубине $\Delta H/D \cong 2,95$ ($\Delta H = 147d_{\text{ш}}$), составляя $\sigma_{\Gamma(\text{ср})} = 0,45-0,75$ кгс/см² в зависимости от величины коэффициентов трения.

Необходимо отметить, что, если высказанные предположения о причинах повышения бокового давления в медленно движущейся засыпке шаровых твэлов относительно ее стационарного состояния частично не соответствуют реальным процессам, то формулы (4) и (7), можно рассматривать как аппроксимацию экспериментальных данных и могут быть рекомендованы для инженерных расчетов. Для оценки давления на блоки кладки наклонного днища бункера существует ряд практических рекомендаций и расчетных зависимостей. Наиболее обоснованной является формула Р.П. Зенкова (8) [1, 8]:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_{\Gamma}}{n_{\sigma}} [(\cos \alpha)^2 + n_{\sigma}(\sin \alpha)^2], \quad (8)$$

где отношение $\frac{\sigma_{\Gamma}}{n_{\sigma}}$ есть вертикальное давление на уровне ΔH (на глубине блоков конической части днища), α – угол наклона конического днища.

Следует отметить, что значения σ_{Γ} , рассчитанные по формуле (4) или (7), для конического днища будут несколько завышены, имея тем самым коэффициент запаса. Приведенные в табл. 1 оценки бокового давления для движущейся засыпки являются, как отмечалось выше, усредненными во времени. Однако, учитывая, что реальный процесс имеет пульсирующий характер с существенно выраженными амплитудами колебаний давления, в табл. 1 приведены данные по максимальным (пиковым) давлениям $\sigma_{\Gamma(\text{пик})}$, зарегистрированным на каждом уровне ΔH . Во многих работах также отмечается наличие пульсаций давления при выпуске сыпучей среды из бункеров и высказываются предположения, что одна из причин колебаний заключается в характере движения сыпучей среды к выгрузному отверстию [2, 9]. Действительно, при отсутствии внешних динамических воздействий причина пульсаций может состоять в периодических перестройках структуры засыпки в зонах сдвига и, следовательно, локальных пульсаций плотности по мере продвижения сыпучей среды к выгрузным каналам. Кроме того, большую роль при перестройке структуры могут играть процессы сводобразования с формированием сложных кинематических цепочек. Наблюдаемые «своды» в отличие от обычных, динамичны по своей природе. Образованная кинематическая цепь, восприняв давление вышележащих слоев, передает их на опоры, но, не обладая достаточной устойчивостью, разрушается, создавая внутри сыпучего тела дополнительные динамические нагрузки. При этом в момент ее разрушения происходит создание новой цепи и так процесс повторяется, в следствие чего давление носит пульсирующий характер.

По-видимому, только таким образом, а именно – наличием внутренних динамических нагрузок – можно объяснить данные по ТНТР-300 [6], показывающие, что пиковые значения бокового давления могут намного превышать величины, рассчитанные по формуле гидравлики $\gamma \Delta H$, даже, если насыпной удельный вес γ определять при минимально возможной пористости $\varepsilon = 0,25$. Усредненное по глубинам ΔH значение максимальных (пиковых) давлений, зарегистрированных при испытаниях на модели ВГ-400 масштаба 1:3 (рис.1, линия 5), составляет $\sigma_{\Gamma(\text{пик})} = 1,45 \sigma_{\Gamma(\text{ср})}$. Тот же показатель для ТНТР-300 составил 2,5 [6]. Количество значений давления близких к максимальным в общем спектре значений, превышающих средние (трендовые) составляет не более 2 % (такое количество получено и в [6]).

Следует отметить, что пульсация давления должна проявляться в основном только в слоях засыпки, начиная с $H/D \approx 1$, то есть там, где начинает проявляться влияние зоны сходящегося течения и выгрузных отверстий.

По результатам проведенных экспериментов определялись величина и периодичность пульсаций давления, рассматривая процесс в координатах $\sigma_r = f(N)$, где N – количество перегруженных шаров.

Визуальная оценка процессов изменения нагрузок на датчиках позволяет предположить наличие монотонной возрастающей (тренда) с наложением на него пульсирующей составляющей. Исходя из этого, трендовая составляющая процесса аппроксимировалась полиномом второй степени, а пульсации – рядом Фурье.

Для проведения последующего гармонического анализа колебательного процесса [10] из экспериментально определенных величин давлений вычитается трендовая составляющая и затем выровненный таким образом динамический ряд с помощью преобразования Фурье представляется суммой гармоник, определяющих закономерности развития исследуемого процесса. Задача сводится к аппроксимации процесса изменения давления при перегрузке конечным рядом Фурье (9):

$$\sigma_r^*(N) = A_0 + \sum_{k=1}^n (A_k \cos W_k n + B_k \sin W_k n), \quad (9)$$

где σ_r^* – горизонтальное давление за вычетом тренда, кгс/см²; n – текущее число перегруженных шаров; A_0, A_k, B_k – коэффициенты Фурье, причем $A_0 = 0$; $W_k = \frac{2\pi}{T}$ угловая частота повторения; $\frac{1}{T}$ – основанная частота процесса, соответствующая периоду, равному длине записи; T – период, берется равным общему количеству перегруженных шаров $\approx 800\,000$.

Таким образом, функция $\sigma_r^*(N)$ составлена из суммы синусоидальных и косинусоидальных функций, частоты которых кратны основной частоте – $1/T$. Расчеты показали, что вторые и третьи гармоники объясняют $\approx 80\%$ дисперсии процесса. Наиболее важной является вторая гармоника. Процесс изменения нагрузки на датчиках является циклическим и может быть описан периодическими функциями, дважды повторяющимися за период T . Зависимости амплитуд от глубины расположения датчиков носят практически линейный характер: с ростом глубины амплитуды увеличиваются. Теоретические амплитуды являются сравнимыми с визуально оцениваемыми размахами колебаний реального процесса.

При модельных испытаниях проводились также определения бокового давления при внедрении 55 погружных стержней КС-А3 диаметром $2d_{ш}$ на глубину $33d_{ш}$. Установлено что $\sigma_{z(cp)}$ увеличивается до $0,3-0,5$ кгс/см². Однако по данным [6] ввод 42 стержней на глубину $58d_{ш}$ приводит к значительно большему росту бокового давления на этой глубине – до $1,75$ кгс/см². Установлено также, что при извлечении стержней давление восстанавливается, приходя к значениям до начала внедрения.

Переходя к вопросу использования полученной информации о распределении давления по высоте бункера, необходимо отметить, что измерение давления проводилось на площадках размером $3,5d_{ш} \times 5d_{ш}$, воспринимающих интегральную нагрузку от группы шаров, не дающую информации о нагрузке от каждого отдельного шара. Однако определять контактное давление, необходимое для оценки износоустойчивости графитовой кладки реактора, можно с использованием экспериментально установленных данных, что с площадками таких размеров в среднем контактирует 18 шаров из 25 теоретически возможных.

Заключение

1. Давление шаровой засыпки на боковой отрагатель в реакторах с $H/D \leq 1$ с увеличением глубины монотонно возрастает, достигая в стационарном положении значений $0,07-0,23$ кгс/см² в зависимости от величины коэффициентов трения и диаметра а.з. В состоянии рециркуляции шаровой засыпки трендовая составляющая давления увели-

- чивается более чем в два раза, достигая максимальных значений $0,2-0,3 \text{ кгс/см}^2$ на глубине $3,0-3,5 \text{ м}$ ($50-60d_{ш}$) с наложением пульсирующей составляющей, превышающей в отдельные моменты средние значения не более, чем 1,45 раза.
2. Давление шаровой засыпки в модульных реакторах с $H/D > 1$ (типа ВГМ с $H/D = 3$) возрастает до $0,45-0,75 \text{ кгс/см}^2$ на глубине $8,85 \text{ м}$ ($147d_{ш}$) в зависимости от величины коэффициентов трения.
 3. Сравнения рассчитанных на натурные условия величин бокового давления с известными опубликованными данными по порядку величин удовлетворительно согласуется. В частности, расхождения полученных данных по реактору ВГ-400 и опубликованных по реактору ТНТР-300 составляют от 3 до 9 % с учетом неопределенностей по принятым в расчетах коэффициентам трения.
 4. Анализ результатов проведенных экспериментов и имеющейся априорной информации позволяет утверждать, что в стационарном положении засыпки твэл давление ее на отражатели можно оценивать по формулам (2), (8). Оценку давления в состоянии рециркуляции твэл целесообразно проводить по формулам 4) и (7), а также по (8). При наличии экспериментальных данных на моделях активной зоны оценку давления следует проводить с использованием формул (5 и 6).

Библиографический список

1. **Зенков, Р.Л.** Бункерные устройства / Р.Л. Зенков, Г.П. Гриневич, В.С. Исаев. – М.: Машиностроение, 1977, – 225 с.
2. **Фиалков, Б.Ш.** Кинетика движения кокса в доменной печи / Б.Ш. Фиалков, В.Г. Плицин. – М.: Metallurgy, 1971, – 228 с.
3. **Лукьянов, П.И.** Давление компактного движущегося слоя зернистого материала на стенки аппарата шахтного типа / П.И. Лукьянов и [др.] // Химия и технология топлива. – 1959. – №1. – С. 63-68.
4. **Тлеугабулов, С.М.** Давление столба шихты в доменной печи / С.М. Тлеугабулов, Л.Г. Шумаков, Б.С. Фиалков. // Сталь. – 1965. – №11. – С. 969-973.
5. **Кропотов, В.К.** К вопросу о давлении шихты в доменной печи // Сталь. – 1965. – №11. – С. 973-977.
6. Физико-механические исследования и расчеты конструкций оборудования атомных энергетических установок. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1975, – 340 с.
7. **Гячев, Л.В.** Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах / Л.В. Гячев. – М.: Машиностроение, 1968, – 184 с.
8. **Алферов, К.В.** Бункерные установки. Проектирование, расчет, эксплуатация / К.В. Алферов, Р.П. Зенков. – М.: Машгиз, 1955, – 308 с.
9. **Квапил, Р.** Движение сыпучих материалов в бункерах / Р. Квапил. – М.: Госгортехиздат, 1961, – 80 с.
10. **Вайну, А.Я.** Корреляция рядов динамики / А.Я. Вайну. – М.: Статистика, 1977.

*Дата поступления
в редакцию: 19.04.2019*

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

**RESEARCH OF FUEL PEBBEL BED PRESSURE ON BLOCKS OF GRAPHITE
REFLECTORS IN ACTIVE CORES
OF HIGH-TEMPERATURE GAS COOLED REACTORS**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Purpose: The purpose of the lead researches was working off of methodology of an estimation of fuel elements pebble bed pressure on reflectors of HTGRs active core, and also forecasting on its basis of pressure in existing gas cooled reactor designs.

Methodology approach: The experimentally-calculated method of definition of moving spherical elements pebble bed force influence on blocks of HTGR side reflector, based on physical modelling with use of principles of the theory of similarity is stated.

Results: Great volume of experimental data-settlement on modelling and definition of lateral pressure of spherical pebble bed in HTGRs active cores is received.

Conclusions: The analysis of the received data and their approximation have allowed to define analytical dependences of pressure of pebble bed on a side reflector which can be used in design calculations of reactors. Comparison of the received results with data of foreign researches is lead.

Key words: mechanics of pebble bed, power interaction spherical pebble bed, develop of methodology of an estimation of pebble bed pressure on blocks of reflector, the formulae for an estimation of pressure, distribution of pressure through the bunker height.