

УДК 621.039.546.8;621.039.548.33;624.072.2

## РАСЧЁТ ИЗГИБА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАНАЛА В УРАН-ГРАФИТОВЫХ РЕАКТОРАХ КАК ГИБКОГО СТЕРЖНЯ

Ю.А. Митрофанов, В.М. Замятин\*, Б.П. Белозёров

Северская государственная технологическая академия

\*Томский политехнический университет

E-mail: seversklink@ssti.ru

*Предложена модель, описывающая поведение технологического канала при эксплуатации уран-графитовых реакторов. Методами эллиптических и упругих параметров определены значения прогибов и напряжений в различных сечениях технологического канала в худшем возможном случае.*

### Ключевые слова:

*Уран-графитовые реакторы, технологический канал, графитовая кладка, изгиб стержня, гибкий стержень.*

### Key words:

*Uranium-graphite reactors, process tube, graphite stacking, bar bending, flexible bar.*

Основными элементами конструкции промышленных уран-графитовых реакторов, ограничивающими ресурс их эксплуатации, являются несущие металлоконструкции и, в частности, графитовая кладка. Состояние графитовой кладки во многом определяет вопрос дальнейшей эксплуатации большинства уран-графитовых реакторов. Объясняется это тем, что за период эксплуатации реактора графитовая кладка и расположенный в ней технологический канал претерпевают значительные деформации (искривления), препятствующие штатному проведению технологических операций по обслуживанию и эксплуатации реакторов [1].

Даже небольшие отклонения оси графитовой колонны от вертикали могут привести к значительным трудностям при проведении технологических работ. Повышаются усилия при извлечении технологических каналов и втулок, что свидетельствует о возникновении сил трения между каналом и деталями тракта, а также между втулками и графитовыми блоками в переходных режимах работы реактора. Возникают трудности при калибровке ячеек, при установке технологических каналов и втулок. Всё это требует дополнительных затрат времени на проведение технологических операций в период планово-предупредительного и капитального ремонтов.

Анализ информации, полученный в процессе эксплуатации уран-графитовых реакторов, показал, что многие графитовые колонны на промышленных реакторах имели стрелу прогиба свыше 100 мм. В этих условиях понятно, что увеличение ресурса действующих реакторов, их нормальная эксплуатация невозможны без понимания и учета всех факторов, влияющих на устойчивость как отдельных колонн, так и всей кладки в целом. Иными словами, прогнозирование деятельности нормальной эксплуатации реактора и принятие своевременных мер по стабилизации кладки возможны лишь после исследования всех основных факторов, влияющих на устойчивость кладки.

В связи с актуальностью сформулированной проблемы была проведена научно-исследовательская работа по разработке математической модели, описывающей поведение механической системы «технологический канал — графитовая колонна» в процессе эксплуатации реактора и учитывающей влияние всех основных факторов на процесс ее деформирования.

Было показано, что при определённых условиях технологический канал может вести себя как гибкий тонкостенный стержень, т. е. терять устойчивую прямолинейную форму равновесия. Это может являться первопричиной потери устойчивости графитовой колонны, ряда колонн и кладки в целом.

В качестве математической модели, описывающей поведение канала в процессе эксплуатации, было выбрано нелинейное дифференциальное уравнение устойчивости гибкого упругого стержня [2]

$$\frac{d^2 y / dx^2}{[1 + (dy / dx)^2]^{1.5}} = \frac{M(x)}{EI}, \quad (1)$$

где  $M(x)$  — изгибающий момент в сечении  $x$  стержня;  $E$  — модуль упругости (модуль Юнга) материала стержня;  $I$  — осевой момент инерции поперечного сечения стержня.

Интегрированию уравнения (1) посвящены работы многих учёных. Общими методами решения подобной задачи являются разработанные Е.П. Поповым методы эллиптических и упругих параметров [2]. Авторам удалось найти достаточно компактные общие формулы, которые являются единичными при сильном изгибе как прямых, так и криволинейных тонких стержней независимо от схем нагружения и наложения связей. В дальнейшем развитие вычислительной техники позволило численно решить задачу расчёта гибких упругих стержней. Имеется много работ, в которых рассматриваются различные численные методы исследования изгиба тонких стержней.

Расчёту подлежала та часть технологического канала, которая расположена в активной зоне ре-

актора. В эту часть канала сверху подаётся вода под давлением  $P_1=4$  МПа, которая на выходе из активной зоны имеет давление  $P_2=2$  МПа с перепадом температуры ( $t=100$  °С).

Внутренний диаметр канала  $42,5\pm 0,2$  мм, наружный —  $45^{+0,1}_{-0,2}$  мм, длина канала  $l=8,2$  м. Конструкционный материал канала — сплав алюминиевый САВ-9 или атомаль 11 по ТУ1-5-207-75. Модуль Юнга данного материала  $E=0,69\cdot 10^5$  МПа, предел прочности  $\sigma_s=210\ldots 230$  МПа, температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha=2,25\cdot 10^{-3}$  град $^{-1}$  [3].

При воздействии температуры и давления воды канал может деформироваться, так как верхняя часть его не имеет температурного компенсатора, а в нижней части возможно защемление канала в одном или одновременно в нескольких сечениях. При этом происходит изменение условий закрепления канала и под действием сжимающих нагрузок (как от изменения температуры, так и от давления воды) он может терять устойчивую прямолинейную форму равновесия, т. е. вести себя как гибкий упругий стержень. Амплитуды поперечных перемещений (бокового выпучивания) канала могут достигать 100...150 мм. При снятии внешней нагрузки канал восстанавливает прямолинейную форму, т. о. можно считать, что его деформирование происходит в упругой области.

Учитывая вышеизложенное, в качестве простейшей расчётной схемы технологического канала была выбрана схема, рис. 1. Канал представлен в виде тонкостенного упругого стержня длиной  $l$ , один из концов которого считается жёстко защемлённым, а другой конец при потере устойчивости имеет возможность перемещений в осевом направлении. Осевую нагрузку  $F$  приравниваем значению первой критической силы, поскольку потеря устойчивости происходит именно при этой величине сжимающей нагрузки.

Для нашего случая [3]:

$$F_{кр1} = \frac{\pi^2 EJ}{(0,5l)^2},$$

где  $J=40237$  мм $^4$ ,  $F_{кр1}\approx 1650$  Н.

Действительное значение сжимающей нагрузки  $F$  будет зависеть от фактических условий закрепления канала. Так, в худшем возможном случае, если представить, что оба конца канала жёстко зашклены, температурная сжимающая сила  $N_t$  определится из уравнения

$$\alpha \Delta t l = \frac{F_t l}{EA} \quad \text{или} \quad F_t = \alpha \Delta t EA,$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент линейного расширения материала канала,  $2,25\cdot 10^{-3}$  град $^{-1}$ ;  $\Delta t$  — перепад температур, 100 °С;  $A$  — площадь поперечного сечения канала, 185 мм $^2$ .

В нашем случае  $F_t \approx 3\cdot 10^4$  Н. Таким образом, в худшем возможном случае фактическая сжимаю-

щая сила примерно в 18 раз превосходит величину первой критической силы. Такой величине сжимающей силы должна соответствовать многоволновая форма упругой линии канала. Однако фактическая форма упругой линии канала чаще всего является полуволновой [1], что соответствует сжимающей нагрузке  $F$ , равной величине первой критической силы  $F_{кр1}$  (рис. 2).

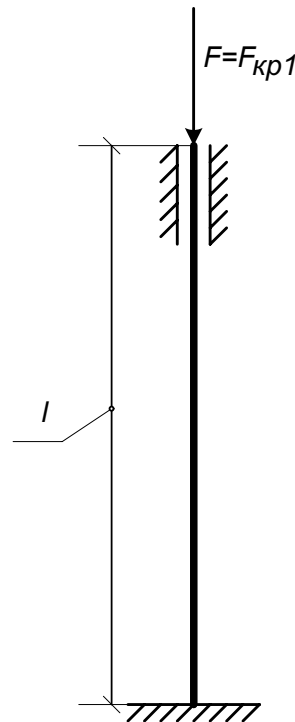


Рис. 1. Расчетная схема канала

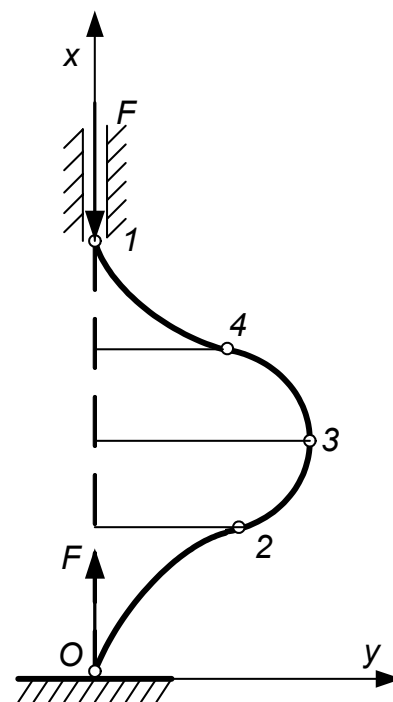


Рис. 2. Форма упругой линии канала, соответствующая  $F_{кр1}$

**Таблица.** Результаты расчёта канала как гибкого стержня

| Метод расчета                  | Точка | Координата, мм |     | Изгибающий момент<br>$M \cdot 10^{-4}$ , Н·мм | Напряжение $\sigma$ , МПа |
|--------------------------------|-------|----------------|-----|-----------------------------------------------|---------------------------|
|                                |       | x              | y   |                                               |                           |
| Метод эллиптических параметров | 0     | 0              | 0   | 62,9                                          | 351                       |
|                                | 1     | 8001           | 0   | 62,9                                          | 351                       |
|                                | 2     | 1953           | 376 | 0                                             | 0                         |
|                                | 3     | 4006           | 751 | -62,9                                         | 351                       |
|                                | 4     | 6009           | 376 | 0                                             | 0                         |
| Метод упругих параметров       | 0     | 0              | 0   | 65,2                                          | 362                       |
|                                | 1     | 7850           | 0   | 65,2                                          | 362                       |
|                                | 2     | 1950           | 376 | 0                                             | 0                         |
|                                | 3     | 3938           | 752 | -65,2                                         | 362                       |
|                                | 4     | 5889           | 376 | 0                                             | 0                         |

Результаты расчётов, проведенные методами эллиптических и упругих параметров [2], представлены в таблице.

Анализ результатов расчёта показал, что оба выбранных метода дают практически одинаковые результаты. Сравнительно большие значения прогибов и напряжений в сечениях канала объясняются тем, что в расчётной схеме конструкции исследуется поведение технологического канала без учёта влияния графитовой колонны и графитовой кладки в целом.

Поэтому на следующем этапе будет исследовано взаимосвязанное поведение графитовой колонны (вместе с технологическим каналом) как единой механической системы. Этому вопросу будет посвящена следующая статья авторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыренов В.Д. Исследование термомеханики графитовых кладо́к промышленных реакторов и разработка мероприятий по продлению их ресурса: Дис... канд. техн. наук. 05.14.03. – Томск, 1985. – 201 с.: с ил.
2. Попов Е.П. Теория и расчёт гибких упругих стержней. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
3. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1986. – 512 с.

Поступила 13.05.2009 г.

УДК 539.376

## ПОСТРОЕНИЕ ЗАМКНУТОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НАПОЛНЕННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ

А.А. Светашков, В.М. Замятин, Н.А. Куприянов

Томский политехнический университет  
E-mail: zvm@tpu.ru

Исследуется механическое поведение резиноподобных эластомеров с наполнителем в виде измельченных металлических частиц. Проанализированы эксперименты по одноосному напряженно-деформированному состоянию образцов, подвергающихся сложным по времени режимам нагружения: растяжению и разгрузке с постоянными скоростями изменения напряжений и деформаций, восстановлению после отдыха, ползучести и релаксации. В математическую модель, прогнозирующую механическое поведение эластомера, введены функционалы, отвечающие за разупрочнение, полученное в результате накопления повреждений и частичную залечиваемость при разгрузке. Предложенная модель удовлетворительно описывает поведение эластомера для сложных по времени траекторий нагружения и деформирования.

### Ключевые слова:

Ползучесть, релаксация, повреждаемость, вязкоупругость, наполненный эластомер, математическая модель, механическое поведение.

### Key words:

Creep, relaxation, damageability, viscoelasticity, extended elastomer, mathematical model, mechanical behavior.

Одним из основных факторов, сдерживающих прогнозирование механического поведения и расчет конструкций из наполненных эластомеров (НЭ), состоящих из резиноподобного связующего и твердых частиц наполнителя, является отсутствие достоверной замкнутой математической модели механического поведения НЭ. Трудности в моделировании деформационных и прочностных свойств

НЭ связаны в первую очередь с учетом происходящих в процессе деформирования микроструктурных повреждений (отслоение частиц наполнителя от связующего). Впервые подобное поведение было исследовано в [1] для вулканизированной резины (эффект Маллинза). Механическое поведение НЭ с учетом упруго-наследственных свойств не может быть моделировано в рамках классической модели