

Я. Р. Дубик¹, Б. М. Васильченко²,
С. М. Агеев¹, И. В. Орыняк¹

¹Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины,
г. Киев, Украина

²ООО «ИПП-Центр», г. Киев, Украина

Прочностный анализ опоры парогенератора ПГВ-1000М

Проанализированы конструктивные решения по опоре парогенератора ПГВ-1000М. Показано, что нагрузка в роликовой опоре распределена крайне неравномерно из-за податливости конструкции ложе-мента; при рабочих нагрузках работают лишь крайние ролики опоры, напряжения в которых превышают предел текучести, что может привести к «заклиниванию» опоры и служить дополнительным источником нагрузок на 111-й сварной шов парогенератора.

Ключевые слова: опора парогенератора, контактная задача, опора качения.

Я. Р. Дубик, Б. М. Васильченко, С. М. Агеев, И. В. Орыняк

Розрахунок на міцність опори парогенератора ПГВ-1000М

Проаналізовано конструктивні рішення щодо опори парогенератора ПГВ-1000М. Показано, що навантаження в роликовій опорі розподілено нерівномірно внаслідок піддатливості конструкції ложе-мента; за робочих навантажень працюють лише крайні ролики опоры, навантаження в яких перевищують границю пластичності, що може призвести до «заклинювання» опори та бути додатковим фактором навантаження на 111-те зварне з'єднання парогенератора.

Ключові слова: опора парогенератора, контактна задача, опора качення.

Эксплуатационные повреждения в области узла присоединения коллектора теплоносителя к патрубку парогенератора ПГВ-1000М атомной электростанции с ВВЭР-1000 (сварное соединение № 111) существенно уменьшают ресурс парогенераторов АЭС. Несмотря на многочисленные исследования, проблема возникновения и развития разрушений в сварном соединении № 111 (СС № 111) продолжает оставаться актуальной.

Характер и расположение повреждений [1] указывают на механическую природу сил, которые их вызывают. В статье анализируется опора ПГВ-1000М с точки зрения ее влияния на напряженно-деформированное состояние коллектора первого контура.

Опора парогенератора (ПГ) состоит из трех частей: ложе-мента, опорного основания и роликовой опоры, которые крепятся к ПГ с помощью приваренного подкладного листа (рис. 1). В свою очередь, роликовая опора состоит из плиты верхней, плиты нижней, плиты средней, направляющих реек и двух рядов роликов — верхнего (пять рядов по 23 ролика) и нижнего (четыре ряда по 28 роликов), которые перемещаются во взаимно перпендикулярных направлениях. Функциональное назначение роликовой опоры ПГ — компенсация температурных перемещений главного циркуляционного трубопровода. В случае высокой нагрузки на роликовую опору она заклинит и не сможет выполнять свою функцию, что ведет к замене трения качения в опоре на трение скольжения. Поскольку значения коэффициента трения скольжения более высокие, возникают дополнительные изгибающие моменты на узел приварки коллекторов первого контура.

На этапе проектирования выполнялся расчет опорных элементов ПГ, в том числе и роликовой опоры [2], суть которого сводится к определению равномерного давления на ролики и затем вычислению поправки на это давление, связанной с возможностью неточного изготовления тел качения и направляющих. Отметим, что методика расчета, взятая из [3], разработана для оценки тел качения станков, где для весьма жестких станин нагрузка распределена равномерно, а с учетом длины рабочих перемещений роликов неточности изготовления действительно первостепенны. Допускаемое контактное давление также берется из [3], где приводится рекомендованное значение контактного давления 23 000 кгс/см², которое служит критерием для всего перечня расчетных случаев: нормальной эксплуатации, сейсмической стойкости, аварийной ситуации.

Целью настоящей работы является исследование распределения нагрузок в роликовой опоре для нормальных условий эксплуатации с учетом податливости опорной конструкции.

Методика расчета. Для правильного расчета нагрузки на ролики необходимо моделировать всю опорную конструкцию. Созданная конечно-элементная модель, представленная на рис. 2, не содержит роликов, контактных пар и второй, нижней части опоры, т. е. контактная задача не решается.

Искомое решение контактной задачи ищется численно-аналитически, путем суперпозиции «единичных» решений:

ролики разбиваются на четверки, которые работают симметрично;

прикладывается единичная сила (1 Н) к подкладному листу;

закрепляется одна симметричная четверка роликов, а точнее — закрепляется их площадка контакта;

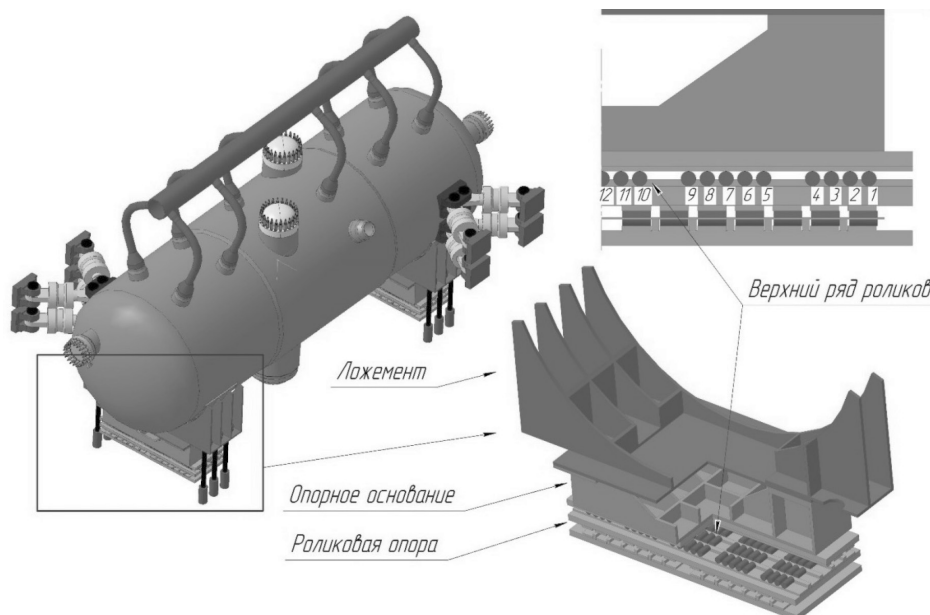


Рис. 1. Парогенератор с опорами

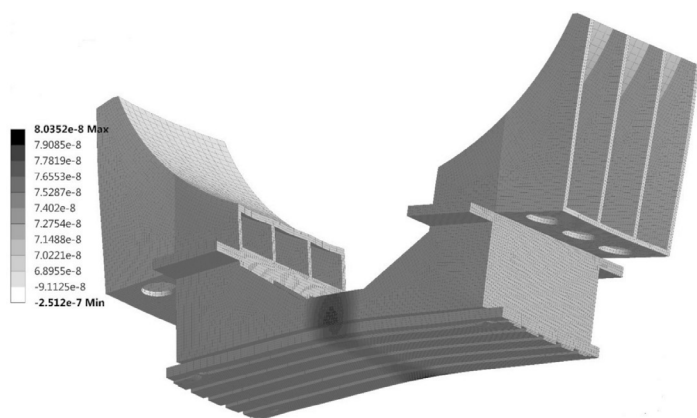


Рис. 2. Вертикальные перемещения опорной конструкции ПГ от единичной нагрузки

определяются перемещения w_{ij} , где i — номер четверки роликов; j — номер закрепленной четверки роликов.

Поскольку в верхней части опоры находятся пять рядов по 23 ролика каждый, имеем 22 пары четверок, 13 пар двоек и центральный ролик. Таким образом, необходимо решить 36 единичных задач. В итоге мы получаем матрицу размером 36×36 с нулевыми диагональными элементами.

Контактная податливость вводилась аналитически [4]. Давление по площадке контакта

$$p_j(x) = \frac{2P_j}{\pi a_j} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a_j^2}}, \quad (1)$$

где P_j — погонная нагрузка на ролик, Н/м; x — горизонтальная координата; a_j — полуширина зоны контакта, которая определяется по формуле

$$a_j = \frac{4P_j R}{\pi E} (1 - \mu^2), \quad (2)$$

где $R = 40$ мм — радиус ролика; E — модуль Юнга; μ — коэффициент Пуассона.

Полная осадка ролика вычисляется по формуле

$$\delta_j = 2P_j \frac{1 - \mu^2}{\pi E} \left(2 \ln \frac{4R}{a_j} - 1 \right). \quad (3)$$

Считаем, что полная сила — вес парогенератора и опорной конструкции R (в ньютонах) — распределена по роликам: $R = \sum P_j$. Таким образом, можно формализовать поставленную задачу следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, \quad (4a)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i w_{ij} + \delta_j = w, \quad j = 1, \dots, n, \quad (4b)$$

где α_j — искомые коэффициенты нагрузки, которые показывают, какая часть приложенной силы приходится на симметричную пару роликов: $P_j = \alpha_j R$; δ_j — осадки роликов в зависимости от силы, которую они воспринимают; w — смещение системы как твердого тела.

Система уравнений (4a) и (4b) является нелинейной и решается итерационно. Для ее решения создана специальная процедура, которая на текущем шаге итерационно уточняет осадку ролика в зависимости от нагрузки, а для следующего шага отбрасывает максимальный коэффициент нагрузки α_j , меньший нуля; таким образом учитывается факт работы роликов только на сжатие. Решение считается найденным, когда все коэффициенты нагрузки больше нуля.

В этой системе уравнений легко можно учесть возможную погрешность изготовления роликов — для этого вектор неправильности формы добавляется в правую часть уравнения (4b).

Громоздкое на первый взгляд решение имеет ряд преимуществ:

поскольку в МКЭ-схеме не решается контактная задача, нет проблем со сходимостью результатов;

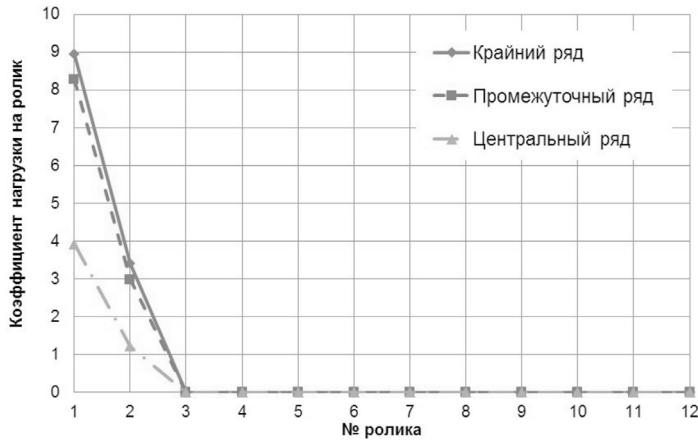


Рис. 3. Распределение нагрузки по верхним роликам

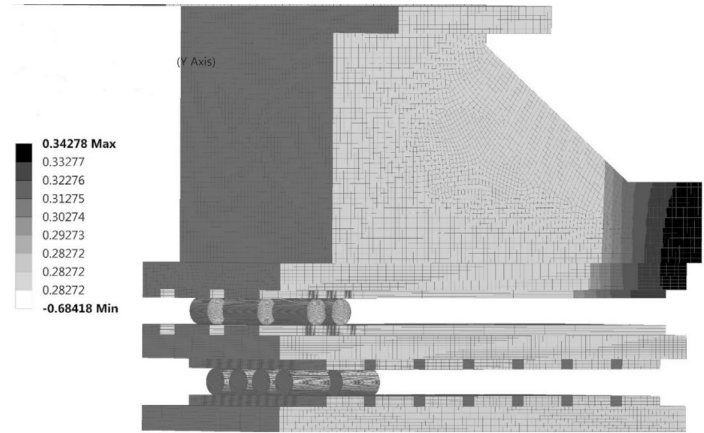


Рис. 4. Вертикальные перемещения полной модели от собственного веса (рабочая нагрузка)

отсутствует необходимость в подробном разбиении на конечные элементы зоны контакта, как следствие — намного меньше размер сетки и намного выше скорость решения;

возможны анализ полученных результатов, выяснение основных факторов;

возможен анализ различных вариантов, в том числе с учетом возможных погрешностей изготовления.

Отметим: без учета податливости роликов в системе уравнений (4а) и (4б), считая, что ролики очень жесткие, вся нагрузка будет восприниматься лишь одной парой роликов.

Анализ результатов расчета. Результаты расчета коэффициента нагрузки на пары роликов в зависимости от ряда приведены на рис. 3. Равномерная нагрузка на ролик рассчитана исходя из полной нагрузки на опору 2,648 МН и 115 роликов в верхнем ряду.

Анализ рис. 3 показывает, что ролики нагружены неравномерно, работают лишь крайние два ролика в каждом ряду, наибольшая нагрузка приходится на крайние ряды роликов и в 9 раз превышает проектную равномерную нагрузку. Данная неравномерность связана с податливостью опорного основания и ложементов; поскольку ролик опора в плане обладает меньшими размерами (рис. 1), вся нагрузка приходится на периферийный ряд роликов.

Проведем небольшое сравнение с проектным расчетом. При анализе возможных погрешностей изготовления во внимание приняты отклонения формы ролика на 3 мкм, разноразмерность роликов в комплекте 8 мкм,

непараллельность направляющих 2 мкм/см. Данные гипотетические отклонения могут как ухудшить, так и улучшить распределение нагрузки. Рабочая нагрузка на одну опору составляет 2,648 МН; умножив эту нагрузку на прогиб от единичной силы 8,0352 мм/Н (рис. 2), получаем прогиб основания, равный 0,213 мм. Прогиб ухудшает распределение нагрузки по роликам, поскольку нагруженными окажутся только крайние ролики, а все остальные ролики не будут участвовать в контакте. В проектном же расчете жесткость опорной конструкции не учтена; принималось, что вся нагрузка равномерно распределяется по роликам и только неточности изготовления могут повлиять на нагруженность тел качения. Таким образом, при проектном расчете использованы неверные начальные допущения о жесткости опорного основания и, как следствие, применена неверная методика расчета жестких станин станков [3].

Зная предел текучести материала ролика — стали 20Х2Н4А [5] — 820 МПа, можно вычислить условие начала пластического течения по критерию Треска [4], например давление на поверхности контакта:

$$p_{pl} = 1,67\sigma_{0,2} = 1370 \text{ МПа.} \quad (5)$$

Используя критерий (5) и определив площадь поверхности контакта, нетрудно вычислить, что в крайних роликах каждого ряда инициировано начало пластического течения.

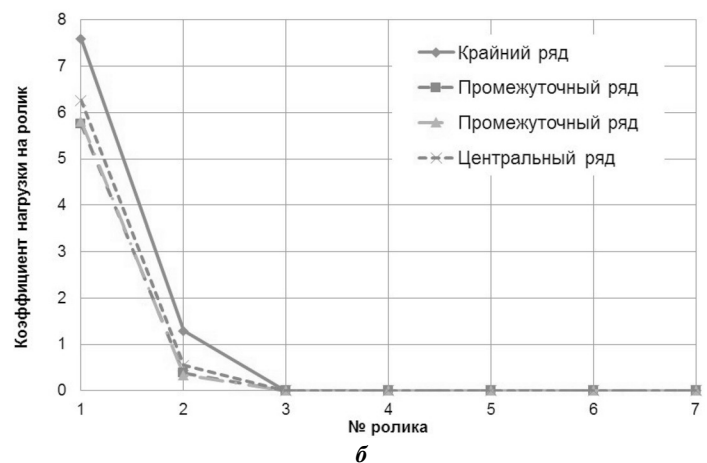
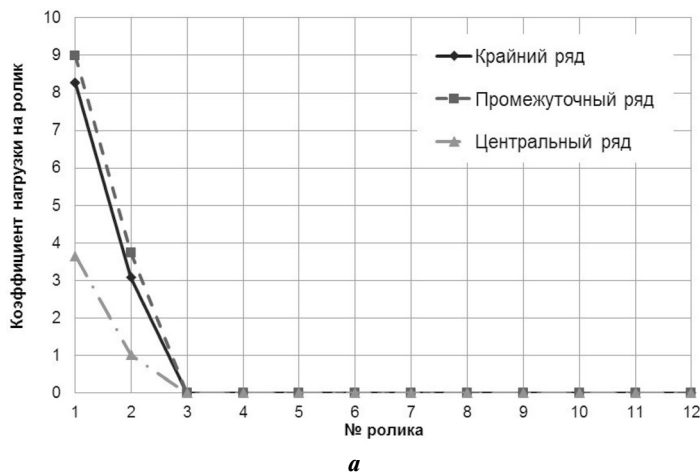


Рис. 5. Распределение нагрузки по верхним (а) и нижним (б) роликам

Дополнительно выполнен анализ неравномерности распределения нагрузки по длине ролика. Наперед зная работающие ролики, их условно разбили на несколько частей и по формулам (1–4) вычислили усилия на эти части. Результаты расчета показали, что ролики нагружены неравномерно не только по рядам, но и по длине (вдоль своей оси), а наибольшая нагрузка приходится на противоположный от центра край роликов и на 10 % превышает среднюю нагрузку на ролик.

На основе полученных результатов создана модель роликовой опоры с роликами (рис. 4), где оставлены лишь ролики, находящиеся в контакте, т. е. два крайних ролика из каждого ряда. Распределение нагрузок по роликам приведено на рис. 5: нижние ролики нагружены меньше верхних, хотя их количество меньше — 112 штук против 115 в верхнем ряду. Это связано с тем, что на периферии находится не пять, а восемь пар роликов, что уменьшает коэффициент перегрузки нижних роликов.

Сравнивая полученные численные (рис. 5, а) и численно-аналитические (рис. 3) результаты, видим их хорошее соответствие. Небольшие расхождения связаны с более полным учетом распределения жесткостей для контактной модели (рис. 4), нагрузка на крайние ролики по-прежнему в 9 раз превышает равномерную нагрузку.

Выводы

В результате анализа распределения нагрузки между телами качения роликовой опоры парогенератора ПГВ-1000М установлено:

1) роликовая опора спроектирована неудовлетворительно, не обладает достаточной жесткостью, что не учтено в проектных расчетах, выполненных, как для жестких станин, с учетом возможных погрешностей изготовления;

2) нагрузка между телами качения распределена крайне неравномерно: наибольшая нагрузка приходится на крайние ряды роликов и в 9 раз больше проектной равномерной нагрузки;

3) более того, в пределах одного ролика нагрузка также распределена неравномерно: ближайший к центру край ролика нагружен на 10 % меньше, чем периферийный край;

4) указанная перегрузка в роликах приводит к возникновению пластического течения и образованию зон неупругой деформации.

С учетом сказанного, в роликовой опоре может произойти замена трения качения на трение скольжение, что приведет к дополнительным изгибающим моментам, которые воспринимает узел приварки коллектора первого контура, и будет служить дополнительным фактором, влияющим на повреждение шва № 111.

Список использованной литературы

1. Красовский А. Я., Орыняк И. В., Гопкало Е. Е., Богдан А. В., Маковецкая И. А. Фрактография эксплуатационного разрушения металла в зоне сварного соединения № 111 парогенератора энергоблока ВВЭР-1000. *Проблемы прочности*. 2015. № 5. С. 24–33.
2. Лукасевич Б. И., Трунов Н. Б., Драгунов Ю. Г., Давиденко С. Е. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 391 с.
3. Левина З. М., Решетов Д. Н. Контактная жесткость машин. М.: Машиностроение, 1971. 264 с.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
5. Сорокин В. Г., Гервасьев М. А., Палеев В. С., Гервасьев И. В., Палеев С. Я. Стали и сплавы, марочник. М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. 608 с.

References

1. Krasovskii, A. Ya., Orynyak, I. V., Gopkalo, E. E., Bohdan, A. V., Makovetskaia, I. A. (2015), "Fractography of In-Service Fracture of the Metal in Weld Joint No. 111 of VVER-1000 Steam Generator" [Fraktografiia ekspluatatsionnogo razrusheniia metala v zone svarnogo soiedineniia No.111 parogeneratora energobloka VVER-1000], *Strength of Materials*, No. 5, pp. 24-33. (Rus)
2. Lukasevich, B. I., Trunov, N. B., Dragunov, Yu. G., Davidenkov, S. E. (2004), "Steam Generators for VVER Reactor Types" [Parogeneratory reaktornykh ustanovok VVER dlia atomnykh elektrostantsii], Moscow, Akademkniga, 391 p. (Rus)
3. Levina, Z. M., Reshetov, D. I. (1971), "Contact Rigidity of Machines" [Kontaktnaia zhostkost mashin], Moscow, Mashinostrieniie, 264 p. (Rus)
4. Johnson, K. L. (1989), "Contact Mechanics" [Mekhanika kompaktnogo vozdeistviia], Moscow, Mir, 510 p. (Rus)
5. Sorokin, V. G., Gervasiev, M. A., Palieiev, V. S., Gervasiev, I. V., Palieiev, S. Ya. (2001), "Steel Survey" [Stali i splavi, marochnik], Moscow Intermet Engineering, 608 p. (Rus)

Получено 13.03.2017.