

## ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ И АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ И ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ (ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ) НА ПРИМЕРЕ ПВДК

На 10 атомных станциях России эксплуатируется 31 энергоблок, и на большинстве из них используются подогреватели высокого давления камерного типа (ПВДК). Ранее конструктивные размеры ПВДК определялись на основе простейших методов теории оболочек. В силу этого все оборудование было спроектировано с многократным запасом прочности. В настоящее время практически на всех станциях ведутся работы по ремонту, перепроектированию и продлению ресурса оборудования АЭС. В данной работе конструктивные толщины камеры высокого давления ПВДК выбраны с помощью ПНАЭГ-7-002-86 [1], и проведен поверочный расчет с помощью системы конечно-элементного анализа ANSYS.

Для подбора размеров  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 1) использовались ПНАЭГ-7-002-86 (п 4.2). В результате расчета были получены размеры ( $S_1=S_2=S=120$  мм), что на 25% меньше используемых в конструкциях на данный момент: ( $S_1=S_2=S=160$  мм). Полученные размеры использованы для построения конечно-элементных моделей и анализа напряженно-деформированного состояния конструкции в системе конечно-элементного анализа ANSYS. Модели (рис. 2) имеют следующие характеристики: осесимметричная модель в пространственной постановке — число элементов  $NE = 5700$ , число узлов  $NN = 28000$ ; пространственная модель с учетом симметрии модели и геометрических особенностей конструкции —  $NE = 22600$ ,  $NN = 55000$ . Для анализа напряженно-деформированного

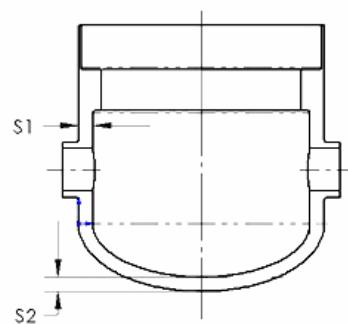


Рис. 1. Паровая камера ПВДК

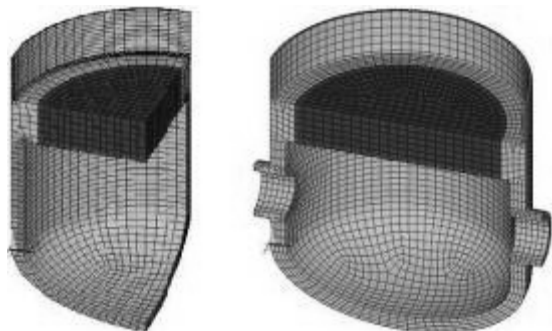


Рис. 2. Конечно-элементная модель

состояния использовался материал со следующими физико-механическими свойствами: модуль Юнга  $E = 2.1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ , плотность  $\rho = 7800$  кг/см<sup>3</sup>.

На первом этапе поверочного расчета была рассмотрена осесимметричная модель подогревателя без учета геометрических особенностей — патрубков входа-выхода питательной жидкости, которая позволяет оценить напряженно-деформированное состояние в корпусе камеры высокого давления.

В результате анализа получено, что максимальный размах приведенных напряжений в элементах оборудования  $(\sigma)_{RV} = 176$  МПа в стенках и дне камеры не превысил допустимых по ПНАЭГ-7-002-86 значений, которые были получены по формуле

$$[(\sigma)_{RV}] = \left(2.5 - \frac{R_{p0.2}^T}{R_m^T}\right) R_{p0.2}^T = 372 \text{ МПа}, \text{ где } R_{p0.2}^T \text{ — предел текучести при расчетной температуре,}$$

МПа;  $R_m^T$  — временное сопротивление при расчетной температуре, МПа;

На втором этапе была рассмотрена пространственная модель, в которой были учтены патрубки входа-выхода питательной жидкости. Эта модель позволяет уточнить напряженно-деформированное состояние корпуса. Значения напряжений в конструкции не превысили допустимых значений, а значит, можно говорить о выполнении условия статической прочности конструкции ( $\sigma_{RV} = 178 \text{ МПа}$ ).

Для конечно-элементных моделей (рис. 2) проводился расчет на статическую прочность в режиме гидравлических испытаний. В режиме гидравлических испытаний напряжения в конструкции составили соответственно для осесимметричной модели  $\sigma_{rv} = 210 \text{ МПа}$ , а для пространственной модели —  $\sigma_{rv} = 232 \text{ МПа}$ , т. е. напряжения для обеих моделей не превысили допускаемых  $[\sigma_{rv}] = 430 \text{ МПа}$ .

На последнем этапе исследований был проведен расчет на циклическую прочность конструкции в соответствии с РД ЭО 0330–01 [2]. Полный цикл состоит из двух режимов — режим «пуск–нормальная работа–останов» (основной рабочий режим) и режим «пуск–гидравлические испытания–останов» (режим гидроиспытаний). Примем, что период эксплуатации установки 30 лет, тогда установка должна отработать 144 цикла «пуск–нормальная работа–останов» и 10 циклов «пуск–гидравлические испытания–останов». Основным критерием циклической прочности в этом случае является значение суммарной повреждаемости  $a_N = \sum_{i=1}^2 \frac{N_i}{[N_0]_i} \leq [a_N] = 1$ , где  $N_i$  — количество циклов нагружения элемента конструкции в эксплуатации,  $[N_0]$  — допускаемое количество циклов нагружения. В нашем случае суммарная повреждаемость составила  $a_N = 0.77$  и  $a_N = 0.79$  для осесимметричной и пространственной моделей соответственно, а значит, требования по циклической прочности для исследуемой конструкции выполнены.

В результате проделанных исследований можно сделать вывод о том, что конструкция с предложенными размерами удовлетворяет критериям статической и циклической прочности, а врезка патрубка несущественно влияет на напряженно-деформированное состояние конструкции, однако за счет уменьшения размеров снизилась металлоемкость конструкции (около 6 тонн), а следовательно, снизились и затраты на производство. В настоящее время ведется сооружение одновременно 7 энергоблоков атомных электростанций в Китае, Индии, Иране и Болгарии, а в течение последних нескольких лет только на одной венгерской АЭС «Пакш» было заменено 24 ПВД камерного типа на всех четырех энергоблоках. У авторов нет сведений о текущих размерах ремонтных конструкций, однако приведенные масштабы ремонта позволяют наглядно оценить необходимость и важность трехмерного моделирования оборудования АЭС с использованием современных систем инженерного анализа.

Одним из перспективных направлений развития данного исследования является анализ напряженно-деформированного состояния областей (зон) с учетом введения в конструкцию трещиноподобного дефекта с оценкой скорости его роста и продолжительности работы ПВДК. В зависимости от местоположения и класса трещины — поверхностная эллиптическая, полуэллиптическая, угловая четвертьэллиптическая — численно будут рассчитаны коэффициенты интенсивности напряжений (КИН), а также проанализированы их размеры и скорости роста, и на основании полученных данных будет предпринята попытка оценить работоспособность конструкции и сделаны выводы об опасности того или иного дефекта в конструкции.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86)/ Госатомэнергонадзор СССР. М., Энергоатомиздат, 1989.

2. Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК и ВВЭР на стадии эксплуатации” (РД ЭО 0330-01) / Росэнергоатом. – М.: 2001. – 139 с.