

ПРОЧНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

1. Введение и постановка задачи. Вертикальные кожухотрубные теплообменные аппараты широко используются в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Если химические аппараты устанавливаются в сейсмически активном районе, существует опасность их разрушения, потери устойчивости и нарушения эксплуатационных режимов. Такие аппараты подлежат расчетному анализу, так как они являются весьма опасными объектами и к ним предъявляются жесткие требования по сейсмостойкости.

Расчет колонных аппаратов на сейсмическое воздействие в соответствии с методиками, опирающимися на ГОСТ Р 51273 – 99 [1] не позволяет получить полную картину деформирования, а также учесть большое количество собственных частот конструкции. Более того, методики расчета на сейсмическое воздействие аппаратов на опорах-лапах отсутствуют вовсе.

В данной работе предлагается подход к расчету напряженно-деформированного состояния аппарата базирующийся на использовании программного комплекса, реализующего метод конечных элементов. Для сейсмических расчетов конструкций применяется линейно-спектральная теория сейсмостойкости [2, 3], которая основана на разложении системы дифференциальных уравнений колебаний по собственным формам. Согласно этому подходу, анализ сейсмостойкости включает следующие этапы: 1). по спектрам отклика вычисляются инерционные сейсмические нагрузки, соответствующие каждой из собственных мод колебаний; 2). данные нагрузки прикладываются как статические, при этом определяются модальные отклики (перемещения, поперечные и продольные усилия, моменты) конструкции; 3). суммируя модальные отклики по формулам среднеквадратичного осреднения, вычисляется суммарный отклик, по которому оценивается сейсмостойкость конструкции.

Рассмотрим вертикальный кожухотрубный одноходовой теплообменник на опорах-лапах с неподвижными трубными решетками (рис. 1). Аппарат состоит из греющей камеры – 1, которая с двух сторон ограничена трубными решетками – 2 с закрепленными в них трубами – 3. Концы этих труб устанавливаются в трубных решетках путем развальцовки или сварки. К корпусу греющей камеры с помощью фланцевого соединения прикреплены распределительные камеры с днищами – 4, а также опоры-лапы – 5. Трубные решетки и пучок труб делят весь объем корпуса теплообменника на трубное пространство, заключенное внутри распределительных камер и теплообменных труб, и межтрубное. Для ввода и вывода теплоносителей корпус и распределительные камеры имеют патрубки штуцеров – 6, 7, 8, 9. Один поток теплоносителя (нагреваемая жидкость) направляется в нижнюю распределительную камеру через патрубок 9, проходит по трубкам и выходит из теплообменника через патрубок 8 в верхней распределительной камере. Другой поток теплоносителя, в данном случае пар, вводится в межтрубное пространство теплообменника через патрубок 6, нагревает снаружи трубы и выводится из корпуса теплообменника через патрубок 7. Аппарат установлен на металлоконструкции (рис. 2).

В расчетах использовались следующие параметры системы: высота аппарата $h = 6\text{ м}$, внутренний диаметр обечайки $D = 0.6\text{ м}$, толщина обечайки $S = 0.01\text{ м}$, длина теплообменной трубы $h_T = 4\text{ м}$, количество труб в теплообменнике – 326, масса аппарата с жидкостью – 3200 кг, масса металлоконструкции – 1150 кг. Высота установки металлоконструкции – 40 м. Материал основных элементов: сосуда, патрубков штуцеров – сталь 09Г2С, теплообменных труб – сталь 20, металлоконструкции – сталь 09Г2С. Расчетные параметры для трубного пространства: внутреннее давление – 0.63 МПа; среднее значение температуры – 170 °С; для межтрубного: внутреннее давление – 1.7 МПа; среднее значение температуры – 204 °С.

2. Математическая модель аппарата. Для создания расчетной модели использовались следующие конечные элементы: 4-узловой элемент оболочки (моделирование обечайки, днищ, трубных досок, опор-лап); 2-узловой элемент упругой прямой трубы (моделирование теплообменных труб); 2-узловой балочный элемент (моделирование металлоконструкции). Приведенные элементы имеют шесть степеней свободы в узле: перемещения в направлениях осей X, Y, Z и углы поворота относительно этих осей. В качестве граничных условий были использованы условия жесткого защемления в 4-х точках основания металлоконструкции. Геометрическая модель аппарата, закрепленного на металлоконструкции, приведена на рис. 2, фрагмент конечно-элементной сетки показан на рис. 3.

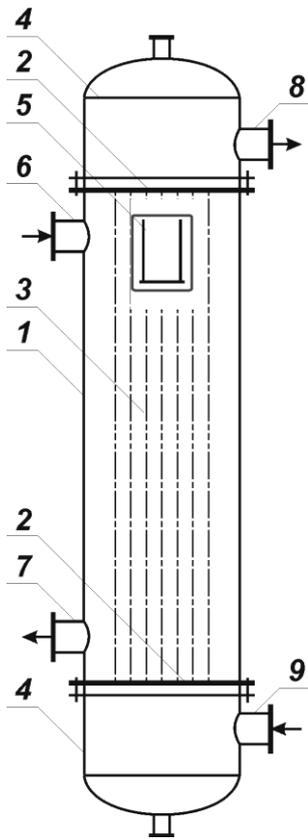


Рисунок 1 – Схема аппарата

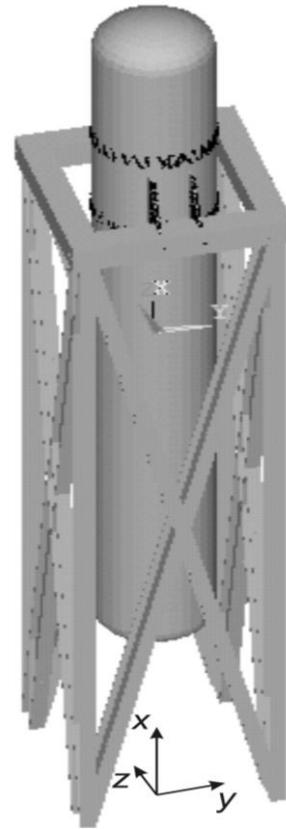


Рисунок 2 – Геометрическая модель аппарата, закрепленного на металлоконструкции

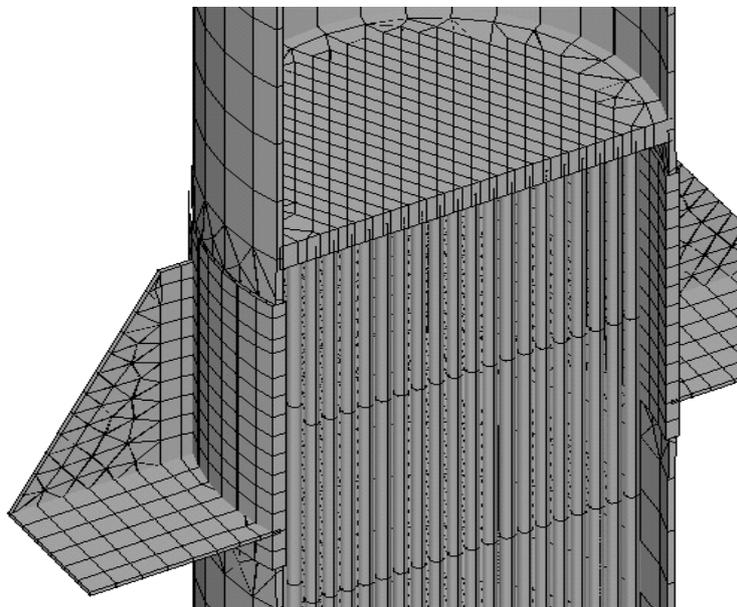


Рисунок 3 – Фрагмент конечно-элементной сетки

3. Статический анализ конструкции. Ниже приведены результаты статического расчета аппарата на прочность. В рабочем режиме на сосуд и теплообменные трубы действует давление жидкости и пара, температурное поле, весовые нагрузки. Учитывалось снижение жесткости трубной решетки от перфора-

ції в області кріплення труб [4]. На рис. 4 представлена діаграма сумарних переміщень трубних решіток. Максимальні прогиби трубних решіток становлять 0.8 мм. Максимальні прогиби теплообмінних труб становлять 4.2 мм і не перевищують зазор між трубами в пучку.

На рис. 5 представлена діаграма розподілу еквівалентних напружень: а) на корпусі апарату; б) в області опори-лапи; в), г) на верхній і нижній трубних решітках; д) в місці примикання верхнього дна к суду. Максимальні осеві напруження на теплообмінних трубах становлять 43.9 МПа. Максимальні еквівалентні напруження виникають в нижніх кутових точках кріплення опор-лап к корпусу апарату і становлять 305 МПа (рис. 4б).

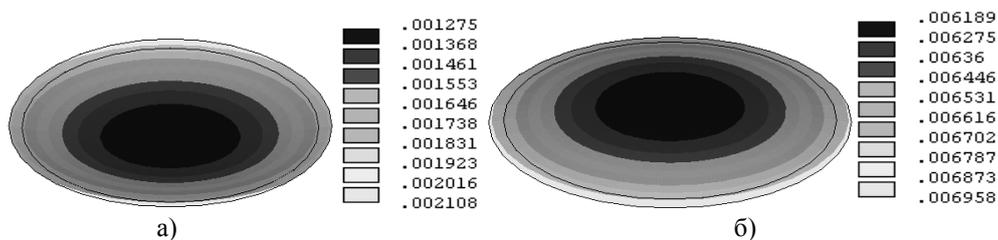


Рисунок 4 – Діаграма сумарних переміщень трубних решіток: а) – верхньої; б) – нижньої

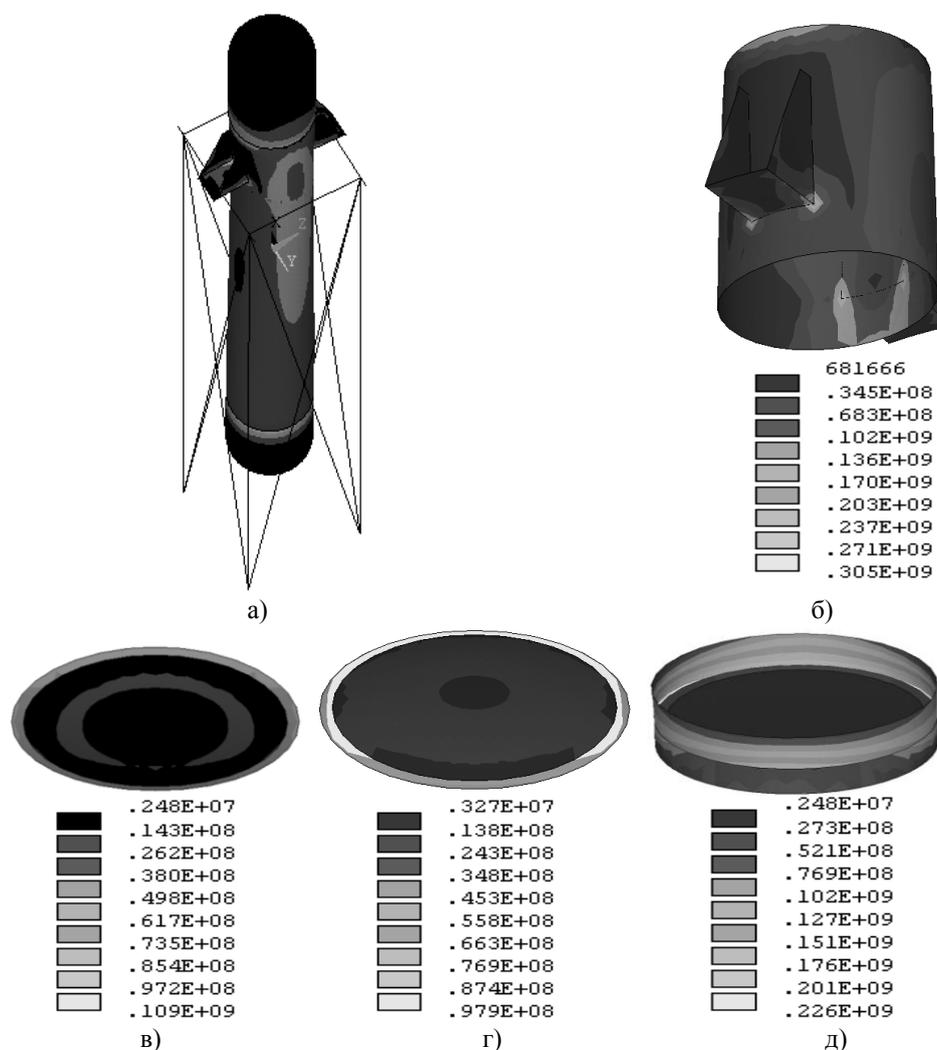


Рисунок 5 – Діаграма розподілу еквівалентних напружень: а) на корпусі; б) в області опори-лапи; в) на верхній трубній решітці; г) на нижній трубній решітці; д) в області примикання верхнього дна к суду

4. Сейсмический анализ системы. Произведем анализ прочности аппарата при действии сейсмической нагрузки. В качестве исходных данных этой нагрузки используем обобщенные спектры ответа (рис. 6) [5]. Используемый подход позволяет исследовать прочность как корпуса аппарата, так и его сборочных единиц, а также позволяет учесть влияние составных частей аппарата, а также позволяет учесть влияние составных частей аппарата, таких как теплообменные трубы и трубные доски, на общую картину деформирования.

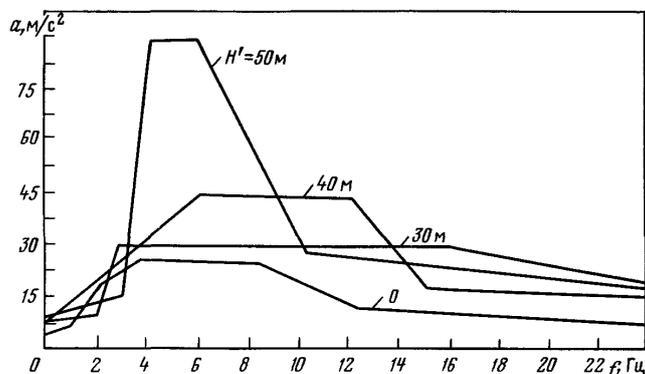


Рисунок 6 – Обобщенные спектры ответа горизонтальных колебаний при относительном демпфировании $K = 0.02$ и сейсмичности площадки 9 баллов

Длина сейсмической волны по сравнению с протяженностью сооружения весьма велика. Поэтому предположим, что при ее проходе фундамент сооружения испытывает лишь некоторое поступательное перемещение в направлении оси z (рис. 2). Это наиболее опасное направление для данного сооружения.

В таблице 1 приведены собственные частоты колебаний конструкции, расположенные в порядке возрастания в диапазоне от 0 до 24 Гц. Этот диапазон соответствует частотному диапазону сейсмического нагружения. Символом i обозначен порядковый номер собственной формы, начиная с моды, соответствующей минимальной собственной частоте; символами ω_i обозначаются соответствующие значения собственных частот в Гц. Отметим, что частоты с номерами 4=653, 676÷1314 отвечают формам колебаний теплообменных труб. Поэтому они близки.

Таблица 1 – Собственные частоты колебаний конструкции

i	1	2	3	4–653		654	655	656	657	658
ω_i	3.7212	5.4732	6.5486	6.5754–6.6391		7.2801	8.8068	8.8252	9.1999	11.438
i	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668
ω_i	11.519	11.644	11.648	11.902	11.912	12.145	13.062	14.840	15.784	16.233
i	669–671		672	673	674	675	676–1314		1315	1316
ω_i	17.325		17.341	17.502	17.925	17.934	18.073–18.297		19.088	19.167
i	1317	1318	1319	1320						
ω_i	19.203	19.577	20.956	22.367						

Результаты сейсмического анализа представлены на рис. 7–9. На рис. 7 представлена диаграмма максимальных суммарных перемещений конструкции от сейсмического воздействия. Диаграмма прогибов трубных решеток в направлении оси x представлена на рис. 8. Максимальные прогибы трубных решеток составляют 0.4 мм. Максимальные прогибы теплообменных труб составляют 54.8 мм.

На рис. 9 представлена диаграмма распределения эквивалентных напряжений: а) на корпусе аппарата; б) в области опоры-лапы; в), г) на верхней и нижней трубных решетках. Максимальные осевые напряжения в теплообменных трубах составляют 212 МПа. Максимальные эквивалентные напряжения возникают в нижних угловых точках крепления опор-лап к корпусу аппарата и составляют 421 МПа (рис. 9б).

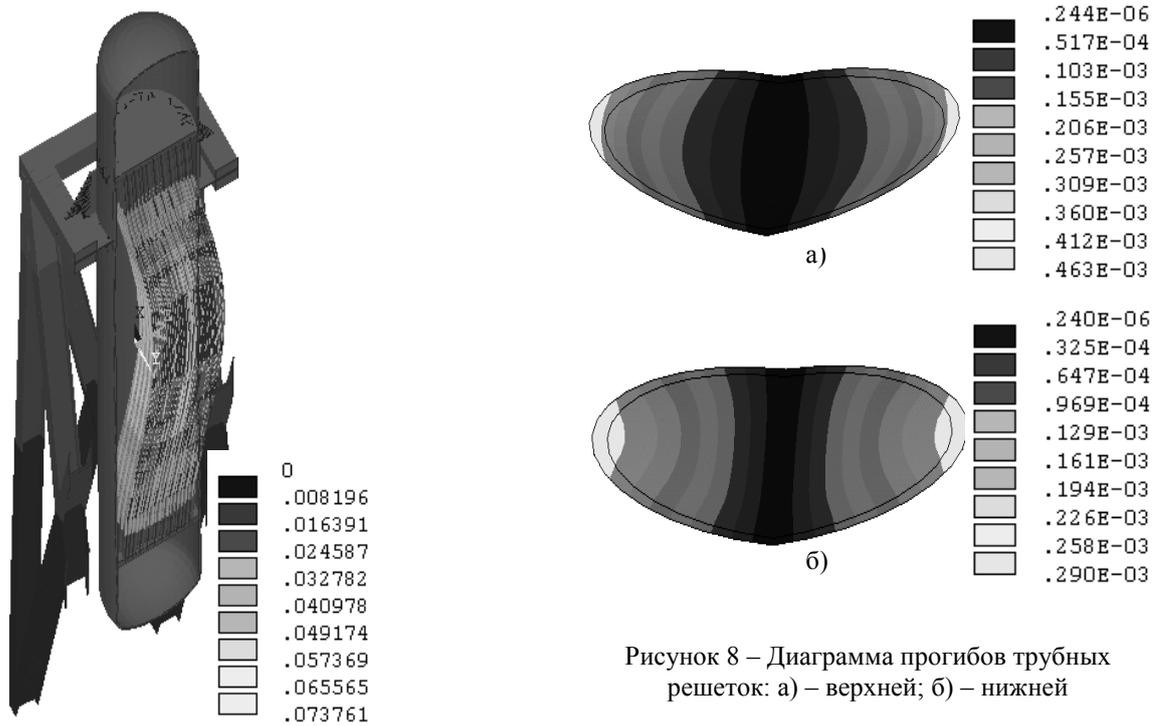


Рисунок 7 – Диаграмма максимальных суммарных перемещений конструкции от сейсмического воздействия

Рисунок 8 – Диаграмма прогибов трубных решеток: а) – верхней; б) – нижней

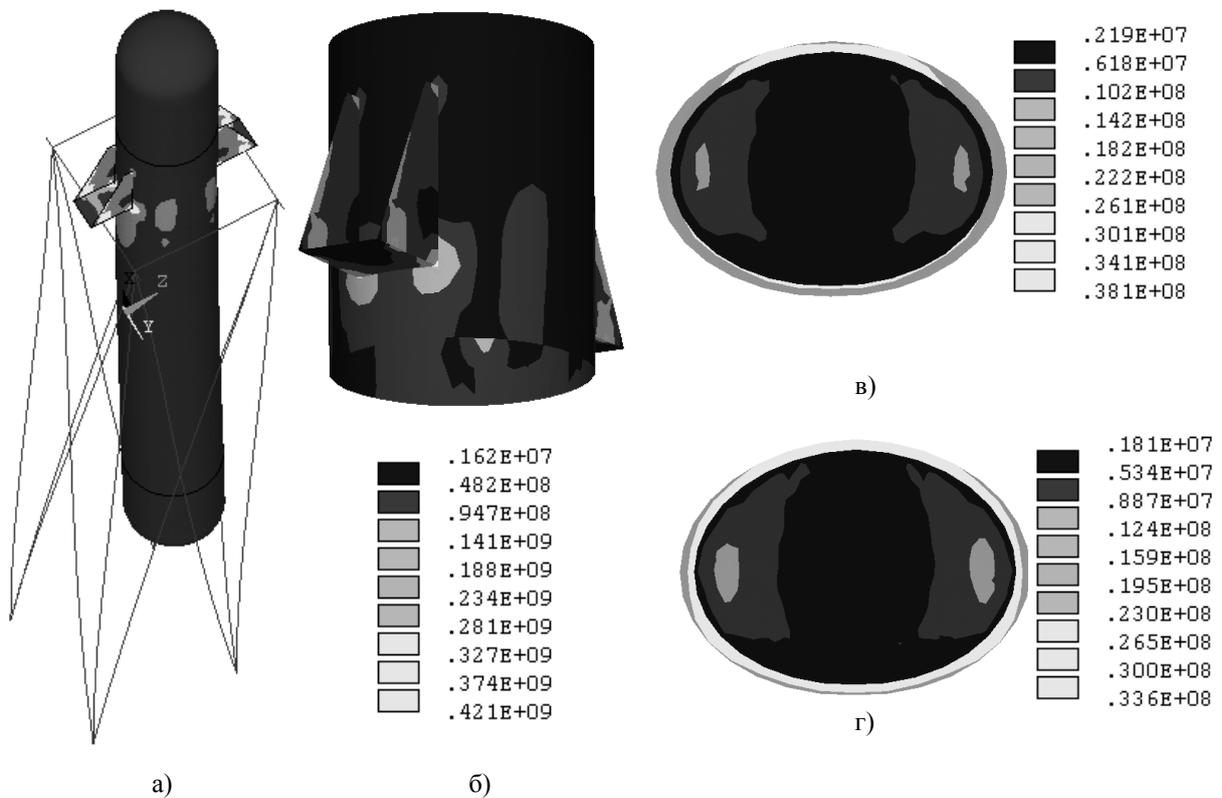


Рисунок 5 – Диаграмма распределения эквивалентных напряжений: а) на корпусе; б) в области опоры-лапы; в) на верхней трубной решетке; г) на нижней трубной решетке

Заключення. В статті представлений аналіз динамічної прочності вертикального кожухотрубного теплообмінного апарату на опорах-лапах, встановленого на металоконструкції, при сейсмічному впливі. Результати розрахунку показують, що максимальні еквівалентні напруження виникають в нижніх кутових точках кріплення опор-лап к корпусу апарату і в суммі (від статических навантажень в робочому режимі і динамічного впливу при сейсмічності 9 баллів) становлять 726 МПа, що перевищує допустимі [6]:

$$\sigma_{max} = 726 \text{ МПа} > 3[\sigma] = 495 \text{ МПа.}$$

Для зниження напружень в опорах-лапах і теплообмінних трубах рекомендується збільшити число опор-лап до чотирьох, а в міжтрубне простір апарату додати перегородки. З проведеної роботи також слід, що необхідно внести зміни в методики і норми розрахунку сейсмостійкості хімічного обладнання. Важливим, і можливо головним, моментом також є запобігання руйнуванню обслуговуючого персоналу.

Економічний ефект може бути розрахований по величині витрат на ліквідацію руйнувань, виникаючих в результаті некваліфікованого розрахунку сейсмостійкості апаратів і будівель.

Література

1. ГОСТ Р 51273 – 99. «Сосуди и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий». – М.: Госстандарт России. 1999 г. – 11 с.
2. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А.Н. Бирбраер. – СПб.: Наука, 1998. – 255 с.
3. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений: учеб. / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лашеников, Н.Н. Шапошников. – М.: Стройиздат, 1984. – 416 с.
4. ГОСТ Р 52857.7 – 2007. «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Теплообменные аппараты». – М.: Стандартинформ. 2008 г. – 45 с.
5. «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок». – М.: Энергоатомиздат, 1989 г. – 528 с.
6. ГОСТ Р 52857.1 – 2007. «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования». – М.: Стандартинформ. 2008 г. – 22 с.

УДК 539.4, 66.045.122

Кочуров Р.Є., Белов С.О., Аврамов К.В., Гнітько В.І.

МІЦНІСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛОБМІННОГО АПАРАТА ПРИ СЕЙСМІЧНОМУ ВПЛИВІ

Проведено міцнісний розрахунок вертикального кожухотрубного теплообмінного апарату на опорах-лапах, встановленого на металоконструкції, на статичні навантаження і сейсмічний вплив. Напружено-деформований стан апарату досліджується за допомогою програмного комплексу, що реалізує метод кінцевих елементів. Для сейсмічних розрахунків конструкцій застосовується реалізація лінійно-спектральної теорії сейсмостійкості.

Kochurov R.E., Belov S.A., Avramov K.V., Gnitko V.I.

STRENGTH OF THE VERTICAL SHELL HEAT EXCHANGER UNDER SEISMIC LOADS

A strength calculations of seismically excited vertical heat exchanger are carried out. Stress-strain state of structure analyzed by using software package that implements the finite element method. Linear-spectral theory of seismic stability is used for seismic calculations.