

# Новый ПАССАТ 2.02

с новыми ГОСТами и расчетом сейсмостойкости сосудов и аппаратов

**В** 2004 году в НТП "Трубопровод" была разработана программа ПАССАТ ("Прочностной Анализ Состояния Сосудов, Аппаратов, Теплообменников") для расчета прочности и устойчивости сосудов, аппаратов и их элементов с целью оценки несущей способности в рабочих условиях, а также в условиях испытаний и монтажа [1].

В программе учитывается взаимное влияние элементов, а в качестве входных данных используются лишь размеры и взаимное расположение элементов и опор, их материальное исполнение и условия нагружения. Расчетные величины, такие как вес, расчетные длины, опорные нагрузки, характеристики колец жесткости (как в цилиндрических обечайках, так и в седловых опорах), длины хорд окружностей и др. определяются автоматически. Большинство элементов — фланцевые соединения, прокладки, заглушки, кольца жесткости, опоры, в том числе для аппаратов колонного типа, и др. — задаются по ГОСТ, ОСТ, АТК из базы данных программы.

Особенностью программы является отображение трехмерной модели рассчитываемого аппарата (также и в полупрозрачном режиме), что позволяет визуально контролировать введенные данные.

В качестве отчета пользователь получает не просто заключение о работоспособности, а полный, оформленный по ЕСКД протокол расчета, включая примененные формулы, ссылки на нормативные документы и промежуточные вычисления. Таким образом, программа полностью имитирует расчет вручную.

В новейшей версии программы (v.2.02) к расчетам сосудов и аппаратов в рабочих условиях, условиях монтажа и испытаний добавлены расчеты с учетом сейсмических нагрузок.

В настоящее время ПАССАТ состоит из пяти модулей.

■ **Базовый модуль** осуществляет расчет прочности и устойчивости горизонтальных и вертикальных сосудов и аппаратов в соответствии с отечественными нормативными документами (НД). Расчет проводится на основе как последнего сборника ГОСТ Р 52857.(1-12)-2007, так и предшествующих ему ГОСТ 14249-89, ГОСТ 25221-

82, ГОСТ 26202-84, ГОСТ 24755-89, РД 26-15-88, РД РТМ 26-01-96-77, РД 10-249-98, ОСТ 26-01-64-83, РД 26-01-169-89, РД 24-200-21-91 и др.

■ **Модуль ПАССАТ-Колонны** рассчитывает аппараты колонного типа на прочность и устойчивость от внешних, ветровых и сейсмических нагрузок на основе ГОСТ Р 51273-99, ГОСТ Р 51274-99 и др.

■ **Модуль ПАССАТ-Штуцер** использует иностранные методики расчета штуцеров и аппаратных фланцев WRC-107/297, ASME VIII и др.

■ **Модуль ПАССАТ-Теплообменники** рассчитывает кожухотрубчатые теплообменные аппараты на основе РД 26-14-88, РД 24.200.21-91, ГОСТ 25859-83, ГОСТ 30780-2002 и др.

■ **Модуль ПАССАТ-Сейсмика** рассчитывает на прочность и устойчивость горизонтальные и вертикальные сосуды (аппараты) с учетом нагрузок от сейсмических воздействий на основе СТО-СА-03.003-2009 [14].

Программа ПАССАТ сертифицирована ООО ЦСПС на соответствие ГОСТ Р 52857.\*-2007, СА 03-004-08, СТО-СА-03.003-2009 и др.

Расчету на сейсмические воздействия подлежат сосуды и аппараты в районах с сейсмичностью 7 и более баллов по шкале Рихтера.

Расчет заполненных жидкостью сосудов на сейсмические воздействия своеобразное "белое пятно" в российском нормотворчестве. В недавно вышедшем сборнике стандартов на сосуды и аппараты [3-11] соответствующий раздел просто отсутствует. Методика же расчета горизонтальных и вертикальных сосудов на сейсмические воздействия, выпущенная ОАО "ВНИИнефтемаш" в 1989 году [15], имеет ограниченную область применения. В частности, здесь не учитывается эффект "плескания" жидкости в сосуде.

За рубежом (в странах Евросоюза, США, Индии и т.д.) существующие стандарты по расчету сосудов на сейсмические воздействия [16-22], как правило, содержат лишь основополагающие требования, реализация которых не детализирована в той мере, которая требуется для проведения практических расчетов. Такой подход характерен для большинства зарубежных

норм, предоставляющих определенную степень свободы для инженерного творчества.

ООО "НТП Трубопровод" в течение двух лет вел разработку стандарта организации [14], предназначенного для практического применения. Тщательный анализ отечественной и зарубежной литературы, нормативных документов позволил создать единую методику расчета сосудов и аппаратов на сейсмические воздействия.

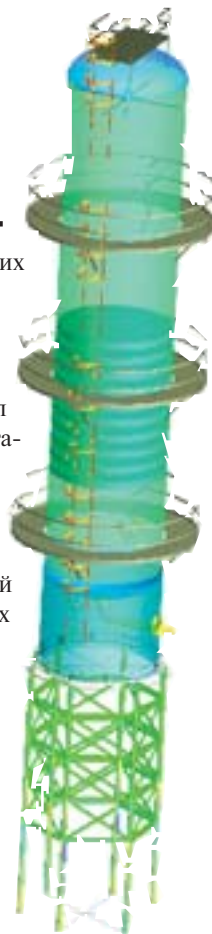
Новый стандарт получил положительную оценку таких ведущих организаций в области сейсмостойкого строительства, как:

- ОАО "СПбАЭП";
- ООО "ЦКТИ-ВИБРОСЕЙСМ";
- Экспертный совет НП "СРО РОСС".

В окончательной редакции стандарта [14] учтены замечания этих организаций. В итоге получился документ, который содержит удобную и наглядную методику расчета горизонтальных и вертикальных сосудов на сейсмические воздействия, пригодную для практического применения. Здесь изложены требования к определению расчетных нагрузок с учетом воздействия землетрясений, приведены критерии оценки прочности и устойчивости.

Для сейсмического анализа сосудов используется линейно-спектральный метод. При землетрясении инерционная нагрузка на резервуары и их НДС определяются с помощью спектров коэффициентов динамичности (спектров ответа) и величин максимальных сейсмических ускорений. Для этого применяется метод модальной суперпозиции, при котором любой искомым отклик системы (усилие, перемещение, реакция и т.д.) представляется некоторой комбинацией соответствующих модальных откликов.

В общем случае рассматривается содержащаяся в сосудах жидкость со свободной поверхностью.



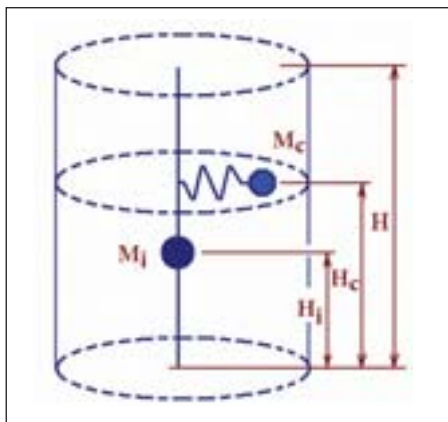


Рис. 1. Расчетная модель вертикального цилиндрического резервуара с жидкостью

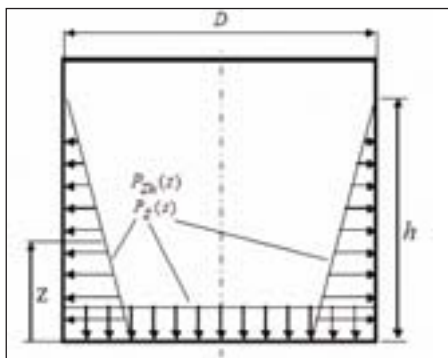


Рис. 3. Гидродинамическое давление на стенки и днище от вертикального сейсмического воздействия

При расчете нагрузок в условиях землетрясения для частично заполненных жидкостью сосудов анализируются совместные колебания жидкости и сосуда. Здесь используется подход, при котором выделяются импульсивная и конвективная составляющие вынужденного движения жидкости при горизонтальном сейсмическом воздействии. При этом корпус сосуда считается недеформируемым (рис. 1). Импульсивная составляющая соответствует связанным (синфазным) колебаниям корпуса сосуда и некоторой части содержащейся в нем жидкости. Конвективная составляющая соответствует низкочастотным колебаниям оставшейся части жидкости относительно корпуса сосуда. Таким образом, учитываются как минимум две формы колебаний для каждого из горизонтальных направлений (одна форма описывает импульсивную составляющую, другая — конвективную) и, по крайней мере, одна форма колебаний в вертикальном направлении.

В расчетной модели резервуара моделируется инерционная сила  $F_i$ , действующая на импульсивную массу  $M_i$ , расположенную на высоте  $H_i$ . Равнодействующая конвективного давления, действующая на высоте  $H_c$ , в механической модели резервуара моделируется инерционной силой  $F_c$ . Конвективная масса считается связанной со стенками резервуара

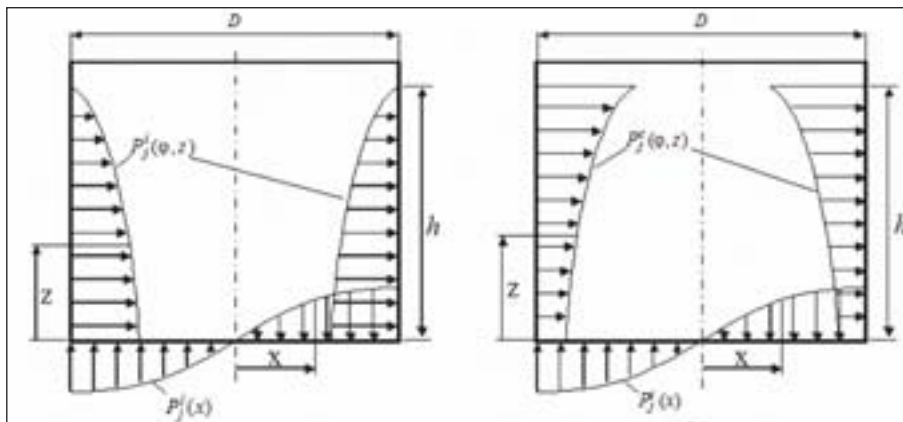


Рис. 2. Импульсивное (а) и конвективное (б) гидродинамическое давление на стенки и днище сосуда

через некоторую конечную жесткость. Гидродинамическое давление на стенки и днище сосуда при сейсмическом воздействии в горизонтальной плоскости ( $j=\{XY\}$ ) раскладывается на импульсивную  $P^i(z)$  и конвективную  $P^c(z)$  составляющие (рис. 2), где  $z$  — вертикальная координата, отсчитываемая от нижней точки сосуда.

На рис. 3 приведена схема вычисления гидродинамического давления на стенки и днище сосуда при сейсмическом воздействии в вертикальном направлении. Суммарное значение давления на днище сосуда от импульсивной и конвективной массы определяется по формуле

$$P_j(x) = \sqrt{P_j^i(x)^2 + P_j^c(x)^2}$$

Любые полученные отклики системы (давление, усилие, напряжение, перемещение и т.д.) от различных форм колебаний системы следует суммировать как корень квадратный из суммы квадратов (ККСК) для получения полного результирующего отклика.

$$S_j = \sqrt{S_{j,1}^2 + S_{j,2}^2 + \dots}$$

где  $S_{jk}$  отклик системы по  $k$ -ой форме колебаний системы при воздействии в направлении  $j=\{XYZ\}$  (как от импульсивных, так и конвективных масс).

Если учитывается только один тон колебаний импульсивной массы и один тон колебаний конвективной массы, полный отклик системы определяется по формуле

$$S_j = \sqrt{S_{j,1}^2 + S_{j,2}^2 + \dots}$$

где  $S_{ji}$  и  $S_{jc}$  — импульсивный и конвективный отклики системы на сейсмическое воздействие в направлении  $j=\{XY\}$ . Полный отклик  $S$  с учетом сейсмического воздействия вдоль осей  $X, Y$  и  $Z$  вычисляется по методу ККСК:

$$S_j = \sqrt{S_{j,1}^2 + S_{j,2}^2 + \dots}$$

где  $S_x, S_y$  и  $S_z$  — отклики системы на компоненты землетрясения вдоль осей  $X, Y$  и  $Z$  соответственно. Отклики должны быть не только одноименными, но и полученными для одних и тех же точек системы;  $S_{cm}$  — отклик от статических воздействий в рабочих условиях.

Вместо метода ККСК допускается использование метода 100-40-40, при этом отклик вычисляется по формуле:

$$S = \begin{cases} S_{cm} \pm S_x \pm 0.4S_y \pm 0.4S_z \\ S_{cm} \pm 0.4S_x \pm S_y \pm 0.4S_z \\ S_{cm} \pm 0.4S_x \pm S_y \pm 0.4S_z \end{cases}$$

Для сосудов категорий II и III при расчете допускается положение, что на изделие одновременно действуют сейсмические нагрузки в вертикальном и одном из двух взаимно перпендикулярных горизонтальных направлений (принимают наиболее неблагоприятное для изделия направление) с учетом воздействия рабочих нагрузок. При этом полный отклик допускается определять по формуле:

$$S = \max(S_{cm} \pm S_x \pm S_z; S_{cm} \pm S_y \pm S_z)$$

При расчете сосуда с учетом дополнительных нагрузок и давления от сейсмического воздействия вместо допускаемых напряжений  $[\sigma]$  и  $[\sigma]_m$ , определяемых в соответствии с требованиями ГОСТов [2, 11], следует подставлять значения, представленные в таблице 1.

Расчет обечаек, конических переходов и днищ на прочность и устойчивость при воздействии давления, осевой силы, момента и поперечной силы проводится в соответствии с ГОСТом [3] с учетом допускаемых напряжений (см. таблицу). При этом в качестве расчетных используются нагрузки, учитывающие влияние статических и сейсмических факторов.

Особое внимание уделено расчету опор и анкерных болтов, выполненных согласно МДС [24]. На рис. 4 показана расчетная модель горизонтального сосуда.

Таблица 1

Категория сейсмостойкости	Подставляется вместо $[\sigma]$	Подставляется вместо $[\sigma]_M$
Is	1.2 $[\sigma]$	1.6 $[\sigma]$
IIs и IIIs	1.5 $[\sigma]$	1.9 $[\sigma]$

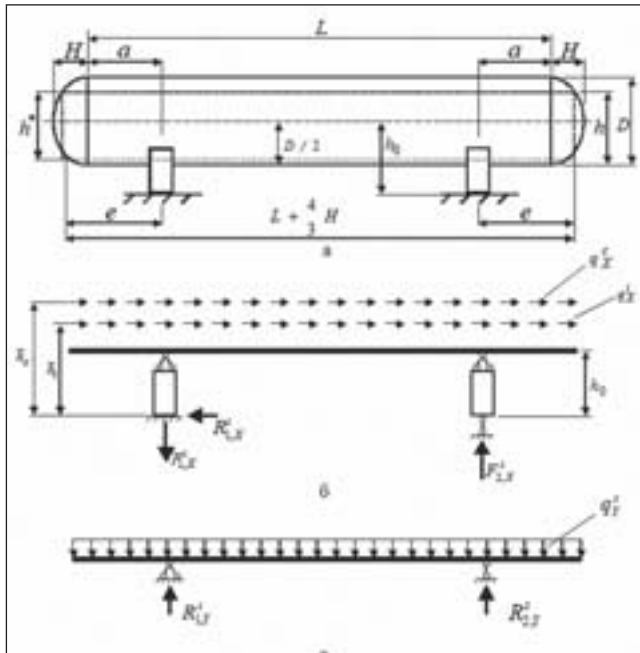


Рис. 4. Расчетная модель горизонтального сосуда

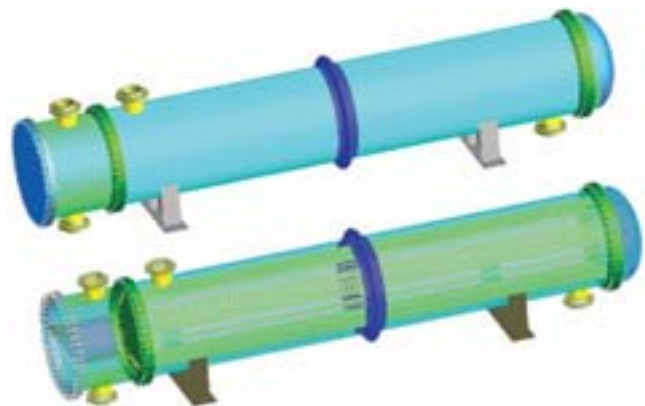


Рис. 5. Расчетная модель горизонтального сосуда

В качестве примера рассмотрен расчет нагрузок от сейсмических воздействий на корпус кожухотрубчатого теплообменного аппарата (ТА) с компенсатором на кожухе. На рис. 5 показана "твердотельная" модель ТА. Расчетные нагрузки от сейсмических воздействий представлены на рис. 6.

Полученные нагрузки используются как дополнительные к рабочим при расчетах корпуса и опор аппарата.

#### Литература

1. Краснокутский А.Н., Тимошкин А.И. Прочностной анализ сосудов и аппаратов в программе ПАССАТ // CADmaster, 2006, №3. — с. 86-89.
2. ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования.
3. ГОСТ Р 52857.2-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек.
4. ГОСТ Р 52857.3-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлении. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер.
5. ГОСТ Р 52857.4-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений.
6. ГОСТ Р 52857.5-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок.
7. ГОСТ Р 52857.6-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках.
8. ГОСТ Р 52857.7-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Теплообменные аппараты.
9. ГОСТ Р 52857.8-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты с рубашками.

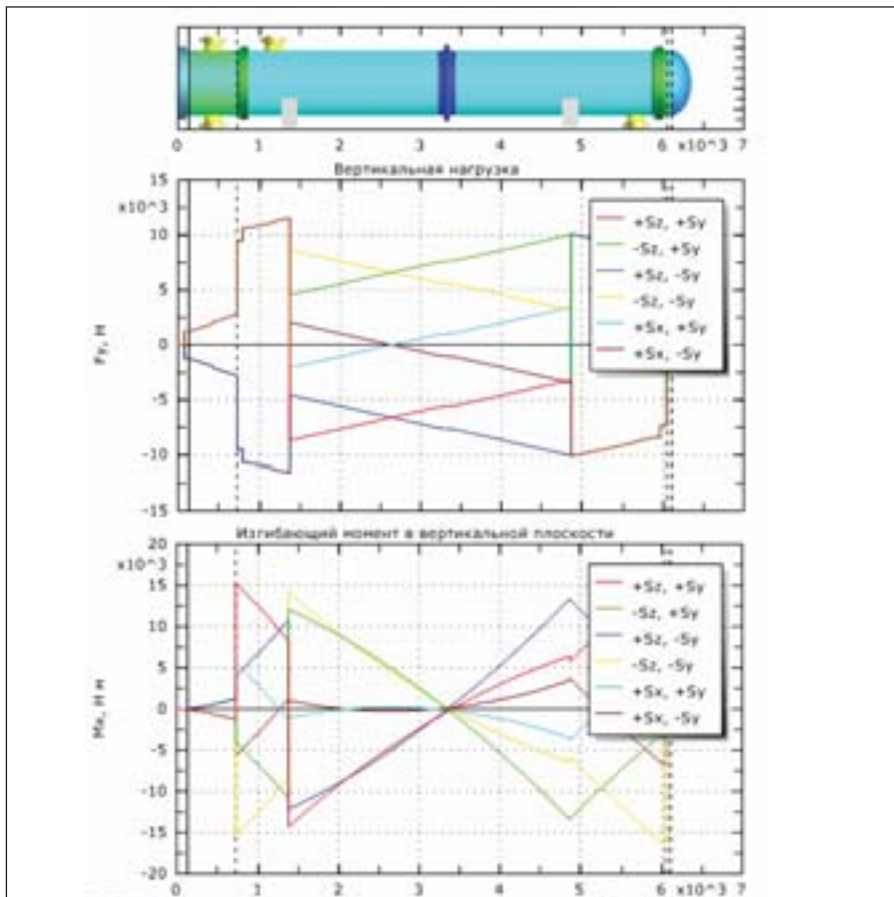


Рис. 6. Эпюры сил и моментов от сейсмических нагрузок



10. ГОСТ Р 52857.9-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение напряжений в местах пересечений штуцеров с обечайками и днищами при воздействии давления и внешних нагрузок на штуцер.

11. ГОСТ Р 52857.10-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты, работающие с сероводородными средами.

12. ГОСТ Р 52857.11-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Метод расчета на прочность обечаек и днищ с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек.

13. СА 03-004-07. Расчет на прочность сосудов и аппаратов. Стандарт ассоциации экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности "Ростехэкспертиза".

14. СТО-СА-03.003-2009 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на сейсмические воздействия. Стандарт ассоциации экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности "Ростехэкспертиза".

15. Методика расчета горизонтальных сосудов на седловых опорах и вертикальных сосудов на опорах-лапах на сейсмические воздействия, ВНИИнефтемаш, М: 1989.

16. IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of liquid storage tanks, Indian institute of technology Kapur, national information center of earthquake engineering, 2007.

17. IITK-GSDMA Review of code provisions on seismic analysis of liquid storage tanks, 2007.

18. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 4: Silos, tanks and pipelines, 2003

19. American Society of Civil Engineers, ASCE 4-98 Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary, 1998

20. American Petroleum Institute, API STANDARD 650, Welded steel tanks for oil storage, 1998

21. Department of Energy Facilities. DOE/EH-0545 Seismic Evaluation Procedure for Equipment in U.S. (SQUG GIP 97)

22. American Water Work Association, ABSI/AWWA D100-96 Welded steel tanks for water storage, 1996 (2005)

23. СНиП II-7-81\* Строительство в сейсмических районах, Госстрой России, М: 2000.

24. МДС 31-4.2000. Методические документы в строительстве. Пособие по проектированию анкерных болтов для крепления строительных конструкций и оборудования.

*Андрей Краснокутский*  
**НТП "Трубопровод"**  
 Internet: [www.truboprovod.ru](http://www.truboprovod.ru)  
 E-mail: [passat@truboprovod.ru](mailto:passat@truboprovod.ru)



## Océ ColorWave™ 600

Высокотехнологичный и экономично выгодный широкоформатный цветной принтер формата **A0**

Нет запаха,  
 эмиссии озона,  
 загрязнения от тонера  
 и чернил, загрязнения  
 окружающей среды



[www.oce.ru](http://www.oce.ru)

Официальный поставщик:

[www.csoft.ru](http://www.csoft.ru)

**(495) 913-22-22**