

## Методики расчетов сосудов и аппаратов и их реализация в программе ПАССАТ

А. Н. Краснокутский, А. И. Тимошкин

*В статье рассматриваются методики и нормативные документы по расчету прочности и устойчивости сосудов, аппаратов и их элементов, и особенности их реализации в разработанной ООО «НТП Трубопровод» программе ПАССАТ. Особое внимание уделяется методам расчета на сейсмические воздействия, а также другим инженерным методам расчета (метод конечных элементов, метод Релея—Ритца, и др).*

**Ключевые слова:** программа ПАССАТ, сосуд, аппарат, колонна, теплообменник, расчет прочности и устойчивости, методика расчета, стандарт, ветровая нагрузка, сейсмические воздействия, собственная частота колебаний, метод конечных элементов, метод Релея—Ритца.

Программа ПАССАТ предназначена 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.

Расчет аппарата (сосуда, теплообменника) — сложный многоэтапный процесс, в котором производятся многочисленные расчеты, связанные с физическими параметрами сосуда, условиями эксплуатации, требованиями нормативно-технической документации (НТД).

Расчеты, производимые программой ПАССАТ, по типу норм и методик, а так же их роли в анализе прочностного состояния, можно разделить на следующие виды:

Методики, установленные нормативно-техническими документами (НТД) — ГОСТ Р 52857.ХХ-2007 [1], СТО-СА-03.003–2009 [2], EN 13445-3 [6], ASME Section VIII [9] и пр. Если для расчета элементов конструкции в ПАССАТ предусмотрено несколько методик, пользователь может выбрать требуемый нормативный

документ на этапе редактирования элемента. Программа автоматически проводит контроль исходных данных на согласованность и соответствие ограничениям методик.

Общие инженерные и вычислительные методы, в том числе лежащие в основе некоторых методик нормативных документов — метод Релея, метод конечных элементов и др.

Вспомогательные расчеты и методы, позволяющие из конструкционных параметров сосуда (аппарата) и условий нагружения автоматически определить ряд величин, которые являются исходными для расчетов по нормативным документам. Примеры таких величин – расчетные длины; массы, как отдельных элементов, так и всего сосуда (аппарата); параметры критического сечения опорной обечайки; объем заполнения сосуда по высоте налива; параметры трубных решёток и т. д. Для определения величин используются как простые, но трудоёмкие при ручном счете вычисления, так и итерационные алгоритмы. К этому виду расчетов следует также отнести балочную

Программа ПАССАТ — стандарт де-факто в России и странах СНГ в области расчетов сосудов, аппаратов и теплообменников на прочность и устойчивость.

Удобство работы с программой, включая интуитивно понятный интерфейс, встроенную базу материалов и стандартных элементов, графическое трехмерное представление модели, автоматический расчет большинства параметров сделало «ПАССАТ» ведущей программой в РФ и странах СНГ. На сегодняшний день активными пользователями программы являются более 150 предприятий России, среди которых: НИИхиммаш (Москва), Петрохим Инжиниринг, ИркутскНИИхиммаш, Ленгипронефтехим, Нефтехимпроект, ВНИПИгазодобыча, ВНИПИнефть (Пермь), ЛУКОЙЛ-Нижегородниинепроект, Нижнекамскнефтехим, ТюменНИИгипрогаз, НИАП, Новгородский ГИАП, Ангарскнефтехимпроект, Волгограднефтемаш, Саянскимпласт, Рязанская нефтеперерабатывающая компания, Гипрогазоочистка (Москва), ФосАгро, Самараоргсинтез, Казаньоргсинтез, Уралоргсинтез, Аммофос, Каустик, ЭМАльянс (Таганрог), Газпромнефть-ОНПЗ (Омск) и др.

конечно-элементную модель, которая используется для автоматического определения взаимного влияния соседних элементов конструкции, а также для расчета перемещений и моментов.

### Нормативные документы

Основные методики, используемые в программе ПАССАТ, соответствуют требованиям ГОСТ Р 52857.ХХ–2007 [1].

Это семейство стандартов определяет нормы и методики основных видов расчетов: расчет обечаек (цилиндрических и конических), различных видов плоских и эллиптических днищ и крышек, укрепления отверстий, элементов теплообменных аппаратов, сосудов и аппаратов с рубашками, фланцевых соединений, а так же учет различных факторов и воздействий — внутреннего и внешнего давления, нагрузки на ортогональные штуцеры, опорные нагрузки на обечайку и днище, малоцикловые нагрузки, агрессивность среды и др.

Стоит отметить, что для расчетов ветровых и сейсмических воздействий, а также расчет на прочность элементов аппаратов колонного типа применяются ГОСТ Р 51273–99 [3] и ГОСТ Р 51274–99 [4].

ГОСТ Р 52857.ХХ–2007 является обобщением и уточнением 32 созданных ранее нормативно-технических документа: ГОСТов, ОСТов, РД, РТМ. В ПАССАТе реализованы как расчеты по новому сборнику ГОСТов, так и по предыдущим НТД.

Стандарт СТО-СА-03.003-2009 по расчету на прочность и устойчивость горизонтальных и вертикальных аппаратов от сейсмических воздействий [2] разрабатывался специалистами ООО «НТП Трубопровод» и ОАО «СПбАЭП» в течение двух лет. Он обобщает ряд исследований и нормативов, и является единственным нормативом по сейсмическому расчету сосудов и аппаратов, учитывающему поведение жидкости внутри аппарата.

В отличие от аналогичных западных нормативов СТО-СА-03.003–2009 достаточно подробно описывает методику расчета. В нем изложены требования к определению расчетных нагрузок с учетом воздействия землетрясений, приведены критерии оценки прочности и устойчивости. Достаточное внимание уделено расчету опор и анкерных болтов.

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. 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

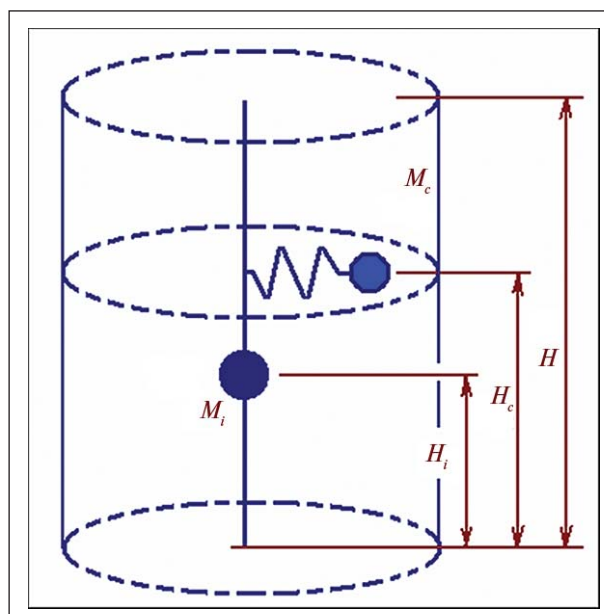
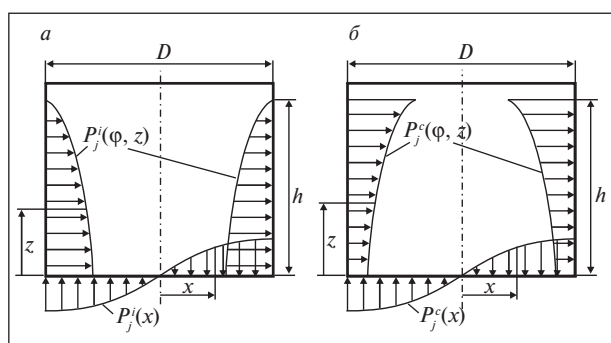


Рис. 1. Расчетная модель вертикального цилиндрического резервуара с жидкостью



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

$H_c$ . Равнодействующая конвективного давления, действующая на высоте  $H_c$ , в механической модели резервуара моделируется инерционной силой  $F_c$ . Конвективная масса считается связанной со стенками резервуара через некоторую конечную жесткость.

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

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

Полный отклик  $S$  с учетом сейсмического воздействия вдоль осей  $X, Y$  и  $Z$  вычисляется по методу ККСК:

$$S = S_{cr} \pm \sqrt{S_X^2 + S_Y^2 + S_Z^2},$$

или по методу 100-40-40:

$$S = \begin{cases} S_{cr} \pm S_X \pm 0,4S_Y \pm 0,4S_Z \\ S_{cr} \pm 0,4S_X \pm S_Y \pm 0,4S_Z \\ S_{cr} \pm 0,4S_X \pm S_Y \pm 0,4S_Z \end{cases}$$

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;  $S_{cr}$  — отклик от статических воздействий в рабочих условиях.

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:

$$S = \max(S_{cr} \pm S_X \pm S_Z; S_{cr} \pm S_Y \pm S_Z).$$

По методике **EN 13445-3** [6] рассчитываются эквивалентные осевые перемещения компенсатора с учетом угловых и поперечных деформаций кожуха при расчете сильфонного (линзового) компенсатора кожухотрубчатого теплообменного аппарата (рис. 3).

Общее эквивалентное перемещение в компенсаторе  $\Delta x = |\Delta x_F| + |\Delta x_M| + |\Delta x_D|$ .

Стандарт Ассоциации «Ростехэкспертиза» **СА 03-004-07** [5] на расчет сосудов и аппаратов на прочность и устойчивость — первая попытка обобщить отечественную нормативную документацию по расчету сосудов и аппаратов (ГОСТ Р 52857.XX-2007 вышли через два года после СА 03-004-07).

Помимо расчетов, описанных в ГОСТ Р 52857.XX-2007, СА содержит методики, заимствованные из западных и отечественных нормативных документов для тех видов расчетов, которые не освещены в должной мере, например, расчет узлов врезки по WRC 107/297 [7, 8] или расчет аппарата колонного типа на резонансное вихревое возбуждение.

Для расчета некоторых элементов конструкции нет готовых методик: в нормативных документах рекомендуется использовать «методы строительной механики».

Таковым, например, является расчет крыши резервуара. В модуле «Резервуары» (появится в новой версии ПАССАТ) такой (автоматический) расчет реализован посредством метода конечных элементов. Крыша моделируется прямоугольными оболочечными элементами.

### Обобщенные методы

Как уже упоминалось, ПАССАТ использует общие инженерные методы, направленные на автоматическое определение расчетных величин сложных конструкций.

Например, для определения изгибающих моментов и сил над и между седловыми опорами горизонтального аппарата, а также опорных нагрузок в вертикальных аппаратах используется метод конечных элементов. За счет использования универсальной балочной модели конструкция аппарата, количество и расположение опор может быть (в отличие от условий методики стандарта) произвольным.

Более подробно мы остановимся на методе Релея — Ритца [10], используемого для определения периода колебаний в расчете аппаратов колонного типа от ветровых и сейсмических нагрузок. Его использование позволило отказаться от чрезмерного упрощения при приведении аппарата колонного типа к модели с 2–3 участками для расчета по стандартной методике.

В качестве расчетной схемы колонного аппарата принимается консольный упруго защемленный стержень (рис. 4).

Аппарат по высоте разбивается на  $n$  участков постоянного поперечного сечения, при этом высота участка  $h_i \leq 10$  м. Количество элементов в расчетной схеме определяется автоматически и зависит от количества участков колонны с постоянным сечением, а также количества сосредоточенных масс (тарелок, насадок, обслуживающих площадок, лестниц, опор трубопроводов и др.).

Распределенные нагрузки от веса  $i$ -го участка колонны (включая изоляцию и рабочую среду) рассматриваются как сосредоточенные силы  $G_i$ , приложенные в центрах тяжести каждого из участков, а сосредоточенные массы  $G_{ik}$  прикладываются к краю  $i$ -го участка. Весовые нагрузки прикладываются вертикально, а ветровая  $P_i$  и сейсмическая  $S_i$  нагрузки — горизонтально. При эксцентричном действии нагрузки (от трубопроводов, площадок, лестниц и пр.) прикладываются соответствующие изгибающие моменты  $M_i$ .

Для аппаратов с произвольным количеством участков период собственных колебаний:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum (G_i y_i^2 + G_{ik} y_{ik}^2)}{g \sum (G_i y_i + G_{ik} y_{ik})}}$$

где  $y_i(y_{ik})$  — перемещение  $i$ -го элемента только от весовой нагрузки  $G_i$  ( $G_{ik}$ ), которая прикладывается в направлении, нормальном относительно оси аппарата (рис. 5).

Для определения линии прогиба расчетная схема представляет горизонтальный упруго защемленный стержень с жесткостными характеристиками сечений аппарата, нагруженный силами тяжести элементов аппарата.

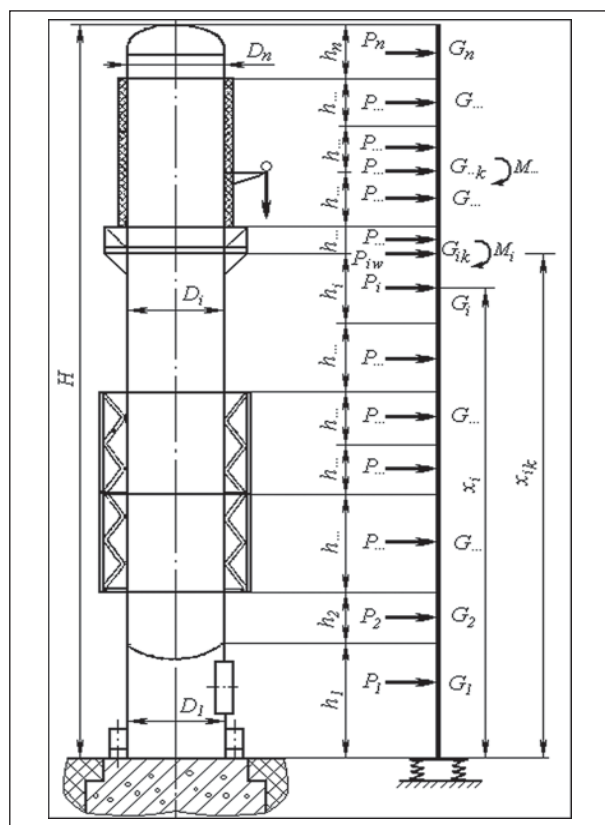


Рис. 4. Расчетная схема аппарата колонного типа

Перемещение центра тяжести каждого элемента определяется нагрузкой и расположением элемента.

Для определения линии прогиба весовые нагрузки от цилиндрической обечайки, изоляции или футеровки (при их наличии), а также веса жидкости принимаются распределенными, а нагрузки от внешних и внутренних устройств (площадки, группы тарелок, насадки и др.) — сосредоточенными.

Начальный угол поворота у основания аппарата:

$$\theta_0 = \frac{M_0}{C_F I_F}$$

$$M_0 = \sum_{i=1}^n (G_i x_i + G_{ik} x_{ik}),$$

где  $M_0$  — суммарный изгибающий момент у основания аппарата;  $C_F$  — коэффициент сжатия неравномерности грунта, определяется по данным инженерной геологии.

Перемещение у основания колонны  $y_{ok} = 0$ .

Нагрузки, действующие на  $i$ -ый элемент ( $i = 1, n - 1$ ) со свободного конца определяются сосредоточенной силой  $G_{ik}$  (при их наличии), а

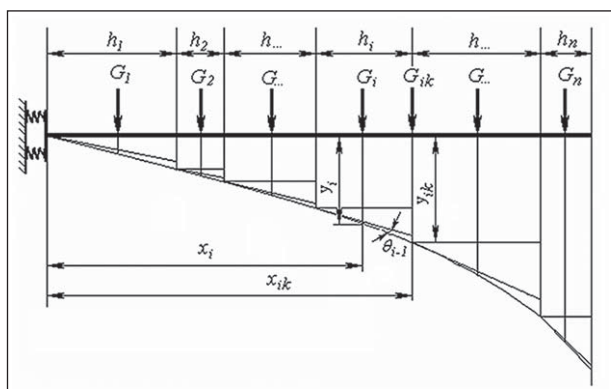


Рис. 5. Расчетная схема для определения периода колебаний

также перерезывающей силой и изгибающим моментом от последующих элементов:

$$Q_i = G_{ik} + \sum_{l=i+1}^n (G_l + G_{lk}),$$

$$M_{Gi} = \sum_{l=i+1}^n (G_l (h_l - h_{ik}) + G_{lk} (h_{lk} - h_{ik})).$$

Для последнего  $n$ -го элемента  $Q_n = 0$ ,  $M_{Gn} = 0$ .

Для определения перемещений  $y_i$  ( $y_{ik}$ ) в местах приложения соответствующих нагрузок  $G_i$  ( $G_{ik}$ ) первоначально определяются силы и изгибающие моменты, действующие на каждый элемент, начиная с последнего.

Линейные и угловые перемещения в элементах аппарата определяются для цилиндрической обечайки ( $i$ -го элемента) в ее центре тяжести и на конце под действием распределенной и сосредоточенной нагрузки, а также изгибающего момента.

### Вспомогательные расчеты

Традиционная сложность применения нормативных документов для практических расчетов заключается в необходимости определить множество вспомогательных исходных величин. К ним относятся:

- расчетная (приведенная) длина как гладкой обечайки, так и с кольцами жесткости;
- вес аппарата;
- определение опорных нагрузок;
- характеристики колец жесткости, включая эффективный момент инерции и пластический момент сопротивления поперечного сечения;

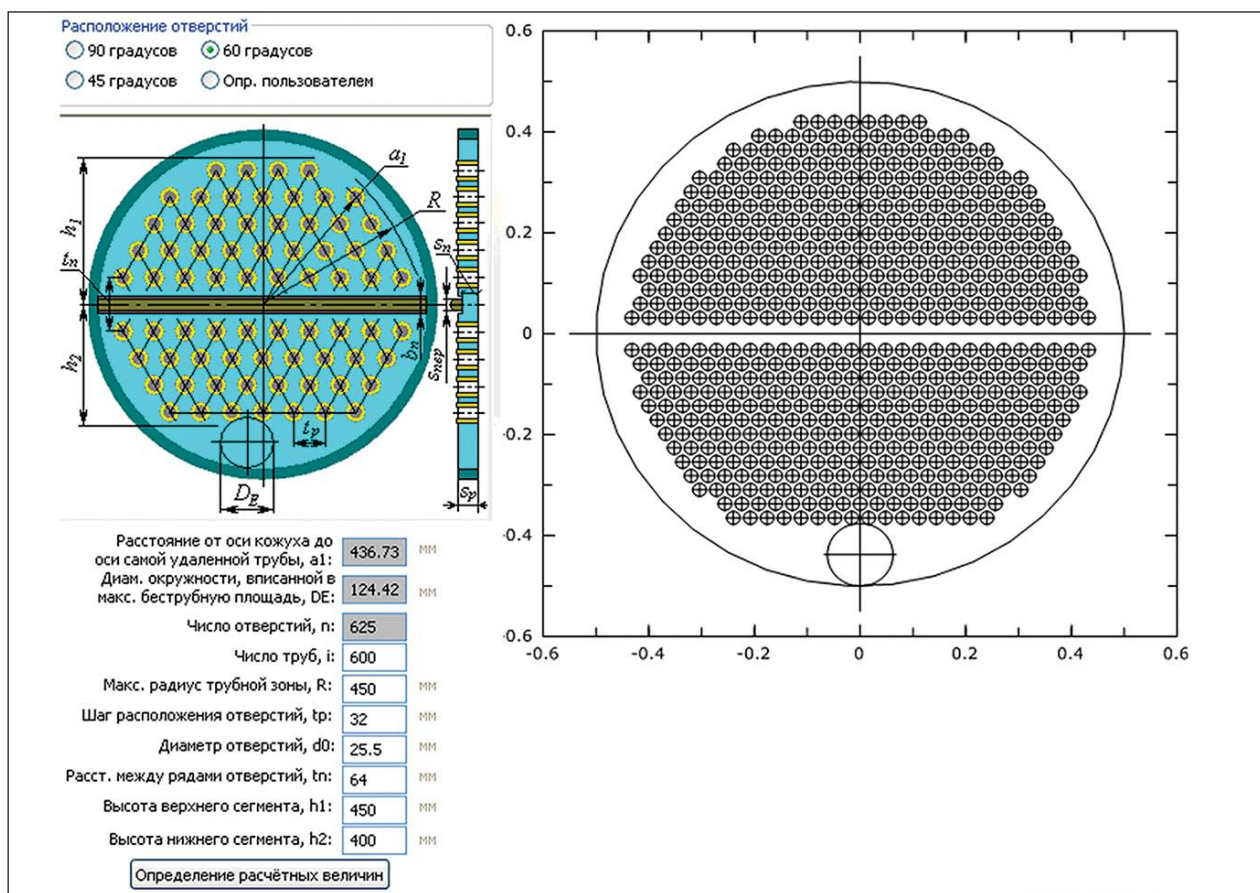


Рис. 6. Определение диаметра окружности, вписанной в максимальную беструбную площадь

- объем, занимаемый продуктом в зависимости от высоты налива;
- определение наиболее ослабленного сечения опорной обечайки аппарата колонного типа;
- определение наиболее ослабленного сечения и коэффициента ослабления плоской крышки;
- параметры трубных решеток, включая диаметр окружности, вписанный в максимальную беструбную площадь (рис. 6);
- проекции сил и моментов;
- учет взаимного расположения отверстий;
- другие параметры.

ПАССАТ выполняет такие расчеты автоматически, освобождая пользователя от трудоемких, порой весьма нетривиальных расчетов, часто требующих специальных знаний, либо однообразных рутинных операций.

Для выполнения этих расчетов используется ряд вычислительных процедур различной сложности. Среди них:

- интерполяционный поиск;
- метод Монте-Карло;
- конечно-элементное балочное моделирование;

- различные алгоритмы вычислительной геометрии;

### Элементы проектирования

Основные виды расчетов, выполняемых ПАССАТ, являются проверочными. При проектировании сосудов и аппаратов требуется не только проверка заданной конструкции, но и подбор параметров. Для этих целей в ПАССАТ предусмотрены предварительные справочные расчеты, позволяющие определить некоторые расчетные параметры элементов. Эти расчеты выполняются в момент редактирования исходных данных, позволяя быстро оценить требуемые величины (рис. 7).

Запас прочности и устойчивости готовой конструкции можно оценить по эпюрам (рис. 8), которые выводятся в результатах расчета сосуда (аппарата).

### Контроль исходных данных

Исходные данные проверяются в процессе моделирования и перед расчетом.

Модель проверяется на корректность геометрии и условия применимости методик.

Для упрощения ввода геометрических параметров и свойств материалов предоставляются

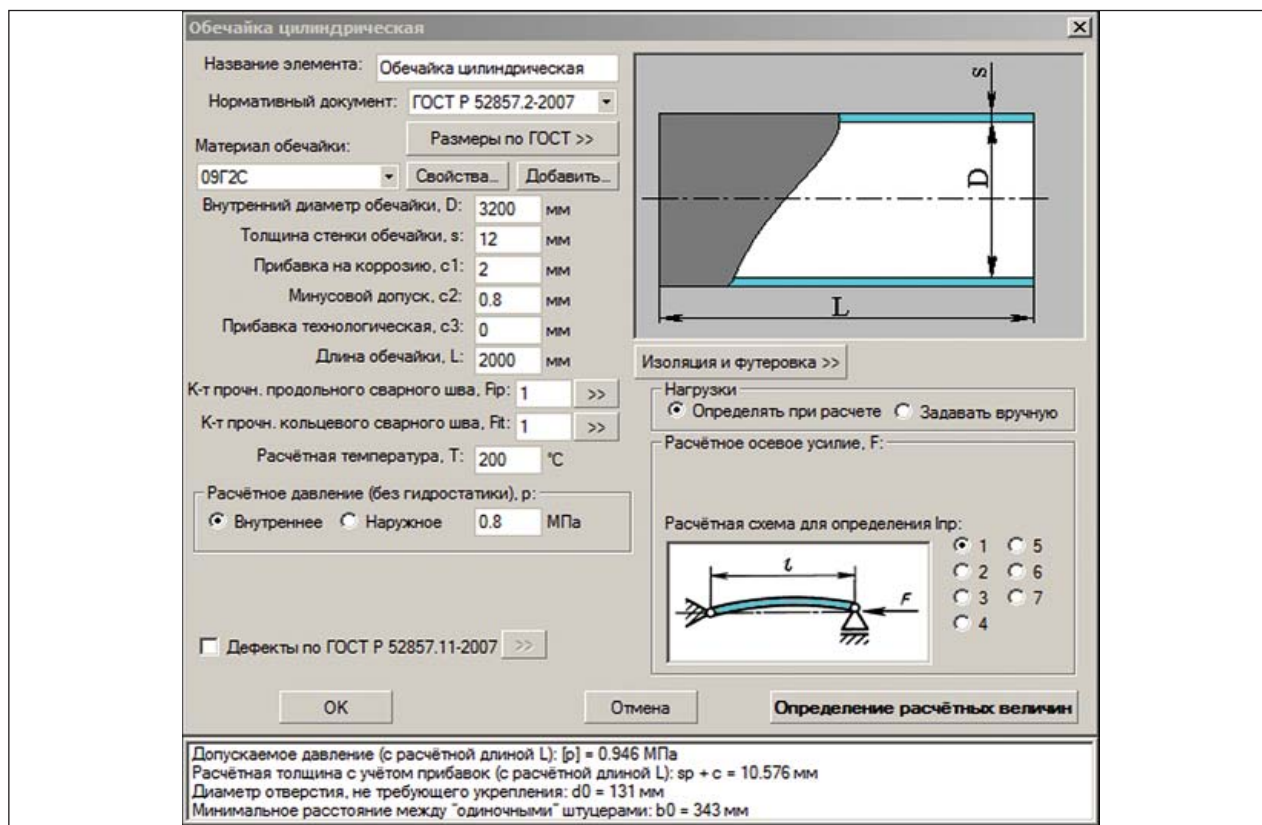


Рис. 7. Редактирование цилиндрической обечайки

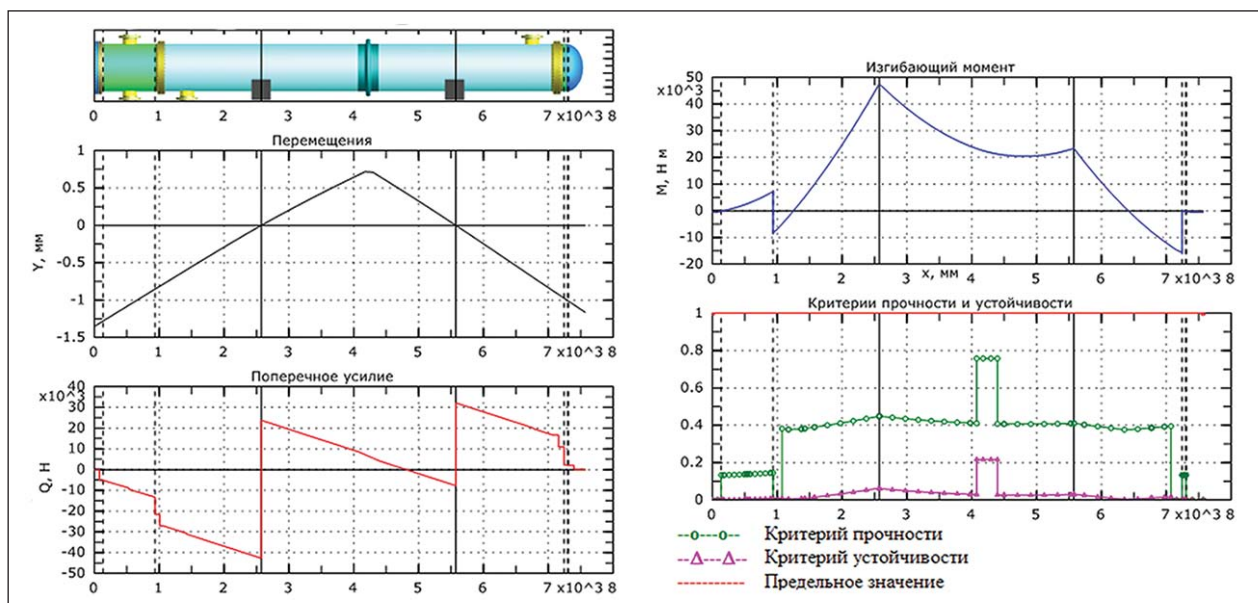


Рис. 8. Эпюры распределения перемещений, поперечных усилий, моментов, критериев прочности и устойчивости корпуса ТА

наборы стандартных материалов и изделий — ПАССАТ имеет расширяемые базы данных материалов, типоразмеров фланцев, крышек, опор, прокладок и т. д.

Ввод данных, нарушающих границы применимости методик, допускается, но в этом случае расчет и оценка работоспособности элемента не производится.

### Литература

- ГОСТ Р 52857.(1–10)–2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
- СТО-СА-03.003–2009. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на сейсмические воздействия.
- ГОСТ Р 51273–99. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий.
- ГОСТ Р 51274–99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность.
- СА 03-004–07. Расчет на прочность сосудов и аппаратов.
- EN 13445-3:2009 Boiler and Pressure Vessel Engineering. Part 3: Design
- WRC-107 Welding Research Council. Bulletin. «Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings», 1979.
- WRC-297 Welding Reserch Council. Bulletin. «Local Stresses in Cylindrical Shells due to External Loadings on Nozzles – Supplement to WRC Bulletin №107», 1987.
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1–2.
- Вайнберг М. М. Вариационный метод и метод монотонных операторов в теории нелинейных уравнений. — М., 1972.

A. N. Krasnokutsky, A. I. Timoshkin

### Vessels and Apparatuses Analysis Methods and Their Implementation in PASSAT Software

Methods and standards of stress and stability analysis of vessel, apparatuses and their elements are discussed, and their implementation in PASSAT software (developed by NTP Truboprovod) is described. Special attention is given to methods of seismic loads analysis, as well as other engineering methods (FEM, Rayleigh–Ritz method etc).

**Key words:** PASSAT software, vessel, apparatus, column, heat exchanger, stress and stability analysis, algorithm, standard, wind loads, seismic loads, natural vibration frequency, finite element method, Rayleigh–Ritz method.