



Проблема выбора нормативов прочности при расчетах ответственного оборудования

[Михаил Ребрин](#)

В настоящее время база нормативно-технической документации при расчетах прочности представлена двумя группами. Они применяются при проектировании и оценке прочности объектов разной степени ответственности.

К первой группе относятся нормы, регламентирующие расчеты на прочность элементов оборудования, подлежащих ведению «Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» (ГОСТ 14249-89, ГОСТ 24755-89, ГОСТ 26202-84, ГОСТ 26859-83 и др.), где представлены аналитические зависимости для расчета толщин несущих обечаек по безмоментной теории гладких оболочек и границы применимости по отношению толщины к радиусу кривизны. Однако об области геометрической применимости таких формул и диапазоне рабочих скоростей нагружения внешними нагрузками в указанных документах не говорится. Видимо, разработчики полагали, что это обстоятельство известно специалистам, занятым прочностными расчетами, и поэтому не требует особого внимания. При обнаружении отклонений от заданных геометрических размеров, дефектов сплошности материала, продления срока службы, расчета остаточного ресурса РД 03-421-01 рекомендует выполнять оценку несущей способности и расчет остаточного ресурса эксплуатации с учетом концентраторов напряжений и влияния краевых эффектов в соответствии с ПНАЭ Г-7-002-86, включая расчеты несущей способности гладких несущих обечаек по безмоментной теории гладких оболочек, то есть по аналитическим зависимостям, аналогичным ГОСТ 14249-89. Таким образом, при проектировании оборудования общепромышленного назначения допускается использовать упрощенные нормы ГОСТ 14249-89, однако при необходимости продления эксплуатации оборудования или при обнаружении каких-либо отклонений в нагрузках (либо особых случаях их сочетания), внешней геометрии, дефектов сварки и т.п. регламентируется подтверждение несущей способности (статической, циклической прочности, сопротивления хрупкому разрушению и др.) только по ПНАЭ Г-7-002-86 (см. РД 03-421-01). К сведению можно отметить полную аналогию германских норм AD Merkblatt B1чВ9 и TRD 301ч310 российским ГОСТ 14249-89, ГОСТ 24755-89, ГОСТ 26202-84, ГОСТ 26859-83, а также ПНАЭ Г-7-002-86, но только в части расчета толщины гладких оболочек по безмоментной теории прочности.

Ко второй группе относятся нормы, регламентирующие расчеты на прочность элементов оборудования, работающих под давлением и подлежащих ведению «Правил устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» (ПНАЭ Г-7-002-86), «Общих положений обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла» (РП-ОТ ЯТЦ-04). Российские нормы прочности по ПНАЭ Г-7-002-86 аналогичны американским нормам прочности «ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Vol. III». В случае отсутствия нормативных методов расчета тех или иных несущих элементов, согласно упомянутым спецификациям норм прочности, предлагается выполнять специальные расчеты с использованием численных методов, таких как метод конечного элемента или натурное тензометрирование рассматриваемых конструкций. При этом указывается, что за правильность применения норм, выбор метода расчета для определения напряжений (деформаций, внутренних усилий) несет ответственность предприятие или организация, выполнявшее соответствующий расчет. ПНАЭ Г-7-002-86 регламентирует, что выбранный метод должен учитывать все расчетные нагрузки для всех расчетных случаев и давать возможность определить все необходимые расчетные группы категорий напряжений. Кроме того, специалист-расчетчик, выполняющий расчет оборудования по нормам прочности ГОСТ 14249-89, не освобождается от ответственности за адекватность полученных результатов расчета условию применимости использованных аналитических зависимостей. Юридически это означает только одно: незнание законов не освобождает от ответственности. Таким образом, инженер, выполняющий расчет, должен иметь хотя бы минимальный уровень знаний по механике разрушения и свои расчеты по упрощенной теории безмоментных оболочек, а также свои сомнения в выполнении условий области применимости использованных норм прочности проверять другим методом, например



методом конечного элемента либо тензометрированием на натуральных образцах. В некоторых странах, например во Франции, регламентирована проверка сходимости найденных напряжений по результатам компьютерного прочностного анализа в двух-трех различных программах (ANSYS, COSMOS, NASTRAN, ABAQUS и т.п.), и уже после этого комплексного сравнения полученных результатов расчетов выносится вердикт по объекту прочностного анализа.

На этапе завершения проектирования или продления срока службы в зависимости от уровня ответственности (тяжести последствий при аварийном разрушении, понесенных обществом и средой обитания) проектируемое/проверяемое оборудование подвергается прочностному расчету с выдачей заключения о степени соответствия прочности несущих обечаек в заданных режимах эксплуатации нормам прочности в течение установленного срока службы. Существующая РД 03-421-01 прямо указывает на приоритет норм ПНАЭ Г-7-002-86 в части применения их для прочностного анализа оборудования (даже если оно спроектировано в соответствии с требованиями норм ГОСТ 14249-89) с отклонениями внешней формы, дефектами сварных швов и т.д. как наиболее надежного инструмента инженера-расчетчика.

Нормы ГОСТ 14249-89 используют для оценки прочности гладких обечаек для наиболее напряженной точки (опасной с точки зрения статического разрушения) по среднему значению напряжения по толщине стенки — так называемого мембранного напряжения. Других напряжений по толщине оболочки не может возникать, поскольку для расчета напряжений применяется упрощенная теория прочности — безмоментная теория. В реальных оболочках под действием внутреннего давления такое состояние наблюдается только в местах, удаленных от врезок, сварных швов, присоединения опор, локальных концентраторов и т.д. Поскольку аналитические зависимости ГОСТ 14249-89 получены по упрощенной теории прочности, то и используют их при проектировании оборудования, разрушение которого не приводит к серьезным последствиям для экологии среды обитания человека. Поскольку аналитические зависимости ГОСТ 14249-89 не учитывают влияние концентраторов напряжений (дефекты, остаточные напряжения, сосредоточенные нагрузки и т.д.), то разрушение конструкционного материала оборудования возможно в режимах импульсного нагружения несущих обечаек внешними нагрузками (импульсным давлением, температурным ударом, сосредоточенным механическим ударом). Например, с целью исключения хрупкого разрушения испытываемого изделия скорость увеличения внутреннего давления при гидроиспытании не должна превышать 0,5 МПа/мин, а температура испытательной жидкости должна находиться в диапазоне от +5 до +40 °С. В регламенте приложения 17 ОСТ 26 291-94 указываются условия пуска оборудования в зимнее время для сосудов, эксплуатируемых при отрицательных температурах и/или на открытой площадке, в том числе регламентирован перечень мероприятий по обеспечению безимпульсного нагружения несущих оболочек. Данные обстоятельства подтверждает профессионализм разработчиков упрощенных норм прочности и их понимание современных механизмов разрушения, а также степень применимости норм ГОСТ 14249-89 к расчету на прочность оборудования с ограниченными последствиями при аварийном разрушении. В нормативной документации норм прочности имеется также классификация оборудования по категориям, классам, группам опасности, однако всестороннее обоснование условий формирования таких групп в полной мере не отражено.

Основное отличие норм ПНАЭ Г-7-002-86 от ГОСТ 14249-89 заключается в том, что, кроме оценки прочности по мембранной составляющей разрушающего напряжения, аналогичной ГОСТ 14249-89, дополнительно используется оценка разрушающего напряжения по сумме мембранного и изгибного компонентов напряжения для учета влияния концентраторов напряжений и влияния краевых эффектов на прочность (статическую и циклическую) несущих элементов в режимах (статика и/или динамика) неравномерного теплового нагрева, действия сейсмических нагрузок и т.д.

Наша группа выполняла оценку статической и циклической прочности камеры запуска очистительного снаряда магистрального нефтепровода ОАО «Курганхиммаш». Анализ результатов расчета камеры запуска по ПНАЭ Г-7-002-86 показывает, что прочность конструкции при циклическом нагружении медленно изменяющимися (статическими) нагрузками удовлетворяет нормам циклической прочности. Это гарантирует безаварийность эксплуатации камеры запуска в условиях действия циклических, медленно изменяющихся нагрузок в течение заданного количества нагружений. Данные результаты подтверждают рекомендации норм прочности по ГОСТ 14249-89: расчеты на циклическую прочность допускается не проводить при количестве циклов, не превышающем 1000. Однако такое утверждение в общем случае верно только при соответствии нормам ГОСТ 14249-89, то есть при условии соответствия нормам статической прочности, отсутствия

Делкам-Урал | 620131 | Россия | Екатеринбург | ул. Металлургов, 16 «Б»
Тел.: +7 (343) 214-46-70 (многоканальный) | Факс: +7 (343) 214-46-76



полей остаточных напряжений, а также концентраторов напряжений в материале несущих элементов и обечаек с величиной напряжений, превышающей $0,9 \leq 0,2$. Действительно, если при проектировании подбором обеспечит во всех зонах конструкции уровень напряжений не более $0,9 \leq 0,2$, включая зоны концентраторов напряжений, то соответствие несущей способности обечаек оборудования нормам циклической прочности будет достигнуто автоматически при количестве циклов, не превышающем 1000. Однако в данном расчете не все зоны анализа камеры запуска удовлетворяют условию статической прочности.

При равенстве коэффициентов запаса прочности результаты расчетов по каждой группе Норм прочности (ГОСТ 14249-89 и ПНАЭ Г-7-002-86) приводят к совпадающим результатам только для случаев статически определимых конструкций, находящихся в безмоментном напряженно-деформированном состоянии, таких как нагруженные статическим (медленно изменяющимся во времени) внутренним давлением цилиндрические обечайки, выпуклые днища и конические переходы в зонах, удаленных от мест приложения сосредоточенных нагрузок, концентраторов напряжений (изменения геометрических параметров: кривизны обечаек, их толщины, узлов врезок, крепления опор и т.п., изменения механических свойств конструкционного материала несущих оболочек, зон сварных швов и т.д.).

Автор этих строк участвовал в адаптации западногерманского оборудования для АЭС в Иране и подтверждении установленного оборудования условиям безаварийной эксплуатации при сейсмическом воздействии нормам ПНАЭ Г-7-002-86. Одним из участников работ (НИКИЭТ им. Н.А.Доллежаля) был проведен анализ национальных норм прочности США, Германии, Франции и Англии. В выводах исследований отмечена аналогия американских «ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Vol. III» и российских норм прочности ПНАЭ Г-7-002-86, являющихся наиболее полными и соответствующими требованиям проектирования оборудования опасных производств повышенной ответственности.

В настоящих экономических условиях решение о соответствии выпускаемых изделий тем или другим нормам прочности (ГОСТ 14249-89, или ПНАЭ Г-7-002-86, или тензометрирование натуральных образцов) приобретает новый оттенок в создании имиджа предприятия как поставщика качественного, надежного, безопасного оборудования, имеющего гарантированный ресурс безаварийной эксплуатации.

Для предприятий с огромным опытом эксплуатации выпускаемых однотипных изделий, по классификации попадающих в ведение «Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением», при проектировании достаточно формального соблюдения требований норм прочности ГОСТ 14249-89. Снижение общественных затрат труда в этой ситуации оправдывает использование упрощенных норм прочности. Однако при выпуске новых изделий (недостаточном опыте промышленной эксплуатации) формальный подход к применению норм прочности ГОСТ 14249-89 потенциально требует подтверждения соответствия выбранных толщин несущих обечаек области применимости нормативных формул. Практически такая проверка не делается по причинам трудоемкости и недостаточной квалификации исполнителя. Правда, на это обстоятельство инспекция Ростехнадзора до наступления аварийных ситуаций особого внимания не обращает, полагаясь на квалификацию специалистов предприятия. Обычно при наступлении события аварийного разрушения выясняется, что требования ГОСТ 14249-89 были нарушены в части подтверждения правильности выбора метода расчета, проверки адекватности области применения формул ГОСТ 14249-89 к спроектированному изделию. Примеров тому масса: аварии несущих конструкций аквапарков, бассейнов, строительных сооружений крытых рынков, нефтепроводного оборудования, оборудования химпроизводств (см. журналы «Промышленная безопасность» и др.). Для ознакомления с примерами инженерно-техническим работникам можно также рекомендовать научно-популярную книгу «Механика разрушения: от теории к практике» В.З. Партона (М., Наука, 1990).

Михаил Ребрин

Канд. техн. наук, ведущий технический специалист ООО «Делкам-Урал».