

Проблемы расчета прочности узлов врезки

А. Н. Краснокутский, А. И. Тимошкин

Статья посвящена методикам и подходам расчета прочности узлов врезки штуцеров в аппараты, использованные в разработанной ООО «НТП Трубопровод» программе «Штуцер-МКЭ». Приводятся сведения об относящихся к данному случаю нормативных документах. Описываются особенности реализованного в программе метода конечных элементов (МКЭ). Дается информация о расчетных возможностях программы.

Ключевые слова: прочность узлов врезки, допускаемые нагрузки, штуцер, сосуд, аппарат, метод конечных элементов, Штуцер-МКЭ.

При проектировании промышленных объектов, в том числе технологических установок химической и нефтеперерабатывающей промышленности, часто решаемой задачей являются расчеты на прочность узлов врезки патрубков трубопровода (штуцеров) в сосуд (аппарат).

Такие расчеты условно можно разделить на три вида:

- проверка работоспособности узла врезки при заданных нагрузках (от трубопровода),
- определение параметров узла врезки (жесткость и податливость) для их учета в прочностном расчете трубопровода,
- определение допускаемых нагрузок на узел врезки.

До последнего времени нормативная база расчета узлов врезки от действия внешних нагрузок и внутреннего давления фактически ограничивалась одним документом [8].

В настоящий момент имеется семейство стандартов [1]. В них для расчета используются коэффициенты интенсификации напряжений аналогично [3–7], и область применения ограничивается ортогональными врезками в цилиндрические обечайки и сферические днища, что охватывает только небольшую часть расчетных моделей.

В отсутствие достаточной нормативной базы проектировщики оборудования склонны занижать допускаемые нагрузки на штуцеры, а проектировщики трубопроводов — наоборот, завышать требования к их прочности. При отсутствии информации о жесткости штуцера его моделируют неподвижной («мертвой») опорой, что делает результат расчета трубопровода излишне консервативным и, как правило, приводит к увеличенным значениям нагрузок на узел врезки.

В качестве универсального метода анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) традиционно используется метод конечных элементов (МКЭ). С использованием МКЭ можно рассчитывать произвольные конфигурации узлов

врезки штуцеров, включая штуцеры, врезанные под углом, не ограничиваясь цилиндрической и сферической формами обечаек, учитывать произвольные схемы укрепления отверстий, взаимное влияние близко расположенных штуцеров и т. д. На практике использовать МКЭ с применением универсальных программ (типа ANSYS) достаточно сложно, так как требуется принять решение о форме КЭ, произвести разбивку модели, выбрать метод расчета, оценить полученные напряжения. В процессе расчета МКЭ требуется отделение пиковых напряжений, возникающих в зонах концентрации (обычно место стыковки штуцера и обечайки) от местных локальных напряжений. Также необходим учет ограничений, связанных с закреплением модели, в том числе краевых эффектов. Сложность проведения таких расчетов предъявляет определенные требования к квалификации инженера.

В 2004 г. ООО «НТП Трубопровод» разработало для Ассоциации РОСТЕХЭКСПЕРТИЗА стандарт СА 0300407 [9]. В этом документе описана методика расчета прочности и жесткости места соединения штуцера с сосудом (аппаратом) с помощью МКЭ при статическом нагружении, в том числе определение жесткости врезки и допускаемых нагрузок на штуцер. Стандарт рекомендован к применению Ростехнадзором. Данная методика реализована в программе ООО «НТП Трубопровод» «Штуцер-МКЭ» и в течение ряда лет успешно применяется.

Для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) в качестве КЭ принят линейный четырехугольный оболочковый изотропный элемент постоянной толщины (аналогичен элементу SHELL43 программы ANSYS) (рис. 1).

Для оценки предельных величин локальных мембранных и изгибных напряжений используется имеющаяся нормативная база [1, 2].

«Пиковые» напряжения располагаются в очень малой зоне концентраторов напряжений, быстро уменьшаются, и на оценку прочности при

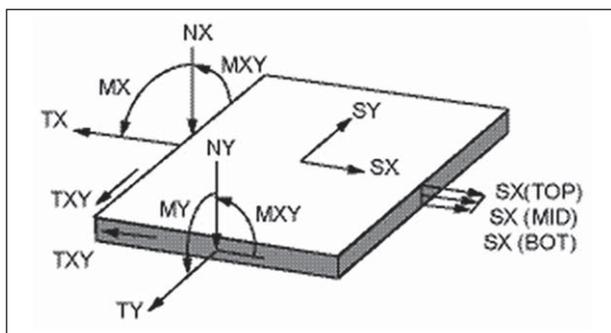


Рис. 1. Оболочковый линейный конечный элемент

статических нагрузках конструкций из пластичных материалов практически не влияют.

Для отделения зоны «пиковых» напряжений от зоны локальных используется следующий подход: конечные элементы, примыкающие непосредственно к линии пересечения патрубка и обечайки (элементы «сварки»), обладают переменной толщиной, при определении которой учитываются минимальные размеры сварного шва, а также толщины обечайки и патрубка (рис. 2).

При определении толщин элементов «сварки» следует учесть необходимость обеспечения равенства жесткостей сварного шва, обечайки и патрубка в зоне приварки.

С одной стороны, толщина элементов, примыкающих к патрубку (обечайке) приравнивается к толщине патрубка S_1 (обечайки S), с другой — определяется по формулам:

$$\text{при } S \geq S_1 \quad t = \max \begin{cases} 1,5 \frac{1,5ss_1 + 1,5\Delta s + 1,5\Delta s_1 + \Delta^2}{2\Delta + 0,5s + 0,5s_1} \\ s + 0,7\Delta \\ s + 0,5s_1 \end{cases} ;$$

$$\text{при } S < S_1 \quad t = \max \begin{cases} 1,5 \frac{1,5ss_1 + 1,5\Delta s + 1,5\Delta s_1 + \Delta^2}{2\Delta + 0,5s + 0,5s_1} \\ s_1 + 0,5\Delta \\ s_1 + 0,5s \end{cases} . \quad (1)$$

Максимальные значения местных напряжений определяются для элементов, непосредственно примыкающих к элементам «сварки». Напряжения для самих элементов «сварки» не определяются и не учитываются.

Расчетные значения нагрузок прикладываются в центре крышки штуцера (рис 3, б). Крышка представляет собой плоский диск высокой жесткости. Значения и направления сил и моментов соответствуют схеме рис. 3, а.

На результаты расчета значительное влияние оказывает частота конечно-элементной разбивки, особенно в области врезки патрубка в обечайку, где имеет место высокий градиент напряжений. С увеличением количества элементов (уровня разбивки), описывающих место врезки, возрастает точность распределения напряжений. Кроме этого, на точность полученных напряжений влияют тип врезки (наличие накладного кольца, угол наклона для косой врезки, и др.), разница толщин обечайки и патрубка, толщина сварного шва, краевой эффект и др.

Для оценки влияния перечисленных факторов на точность расчета был проведен ряд сравнительных расчетов для различных врезок и анализ их результатов. В результате выделено пять уровней разбивки. На рис. 4 показан пример конечно-элементной разбивки для радиальной врезки в цилиндрическую обечайку с накладным кольцом, соответствующий первому и пятому уровням разбивки.

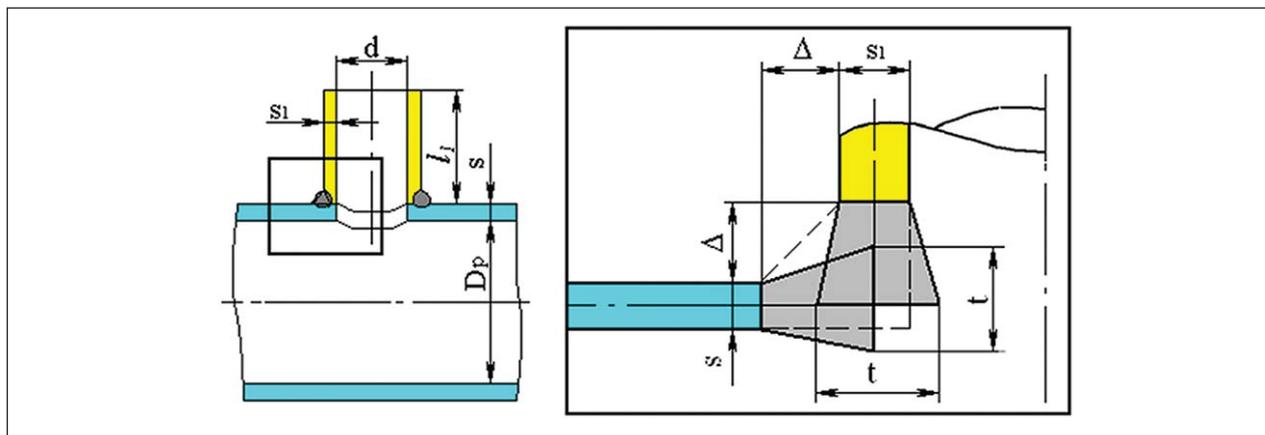


Рис. 2. Размеры элементов в зоне врезки

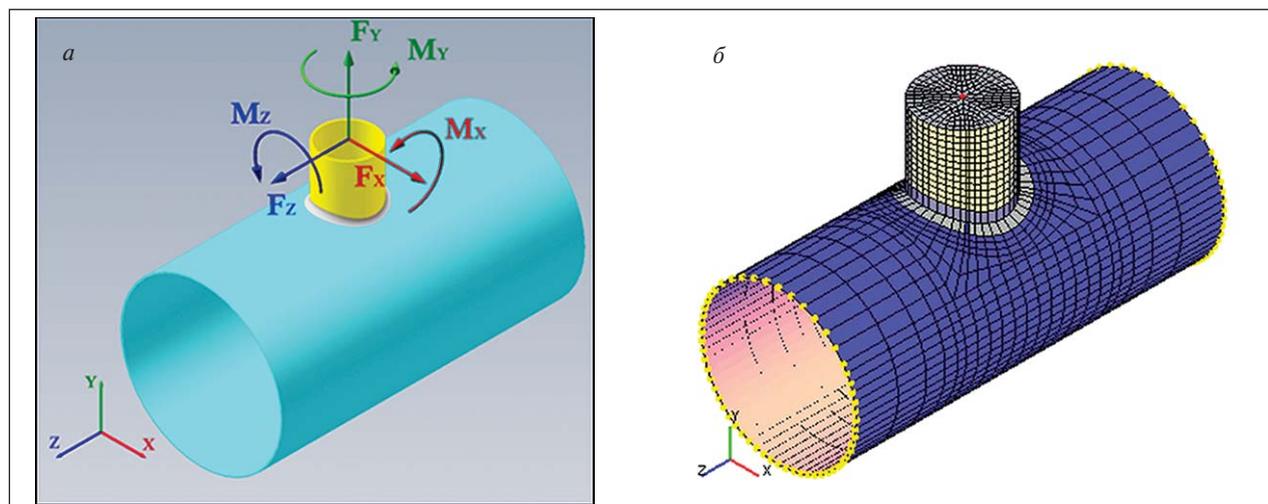


Рис. 3. Схемы нагружения (а) и закрепления (б)

Оценка результатов расчета проводилась по величине **относительной точности** для различных видов нагружения. Под относительной точностью понимается отношение полученных максимальных значений напряжений 5-го и текущего уровней разбивки. При этом относительная точность 5-го уровня разбивки принята равной 1,05.

На рис. 5 представлено влияние уровней разбивки узла врезки, изображенного на рис. 4, на

относительную точность значений максимальных напряжений для различных нагрузок.

Пример распределения напряжений от действия момента M_z при разбивке 1-го и 5-го уровней для врезки с накладным кольцом показан на рис. 6.

Обобщая полученные результаты, можно констатировать, что при увеличении уровня разбивки значения максимальных напряжений возрастают. При этом максимальное влияние уровень разбивки оказывает на напряжения от

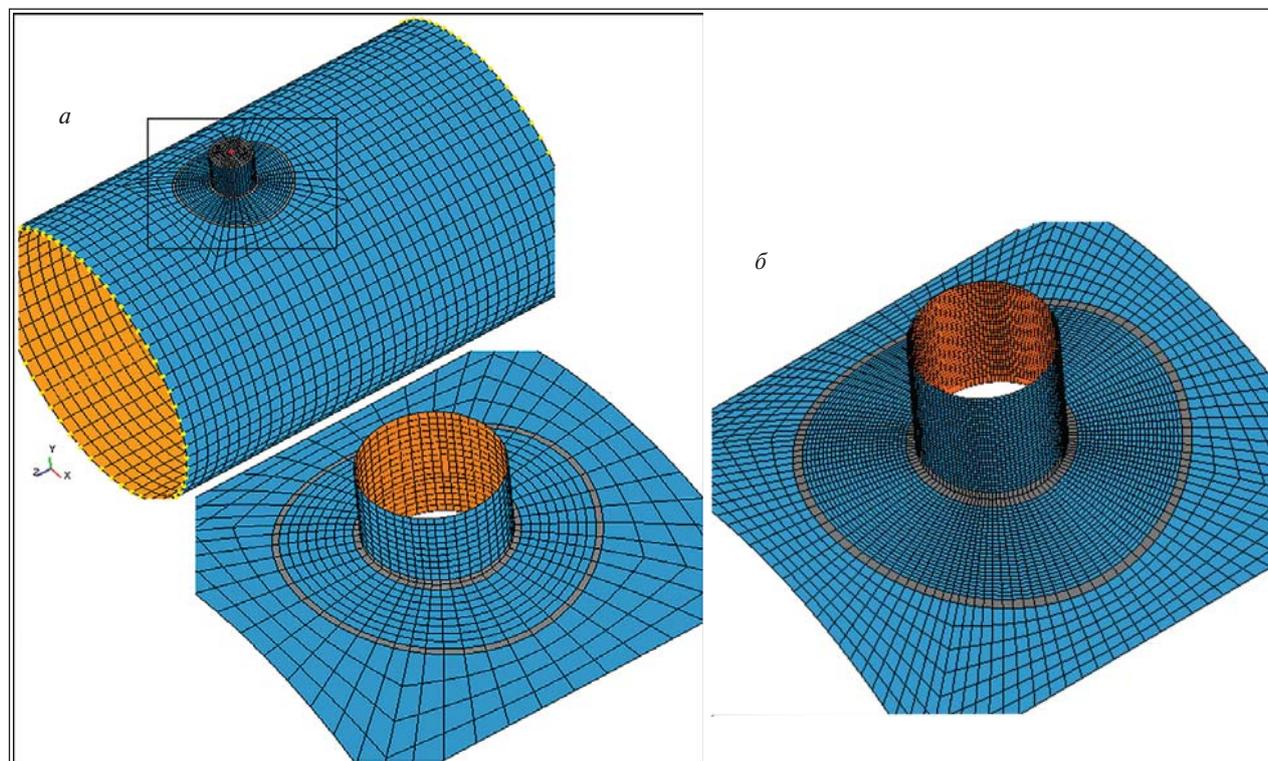


Рис. 4. Конечно-элементная модель врезки, соответствующая 1-му (а) и 5-му (б) уровню разбивки

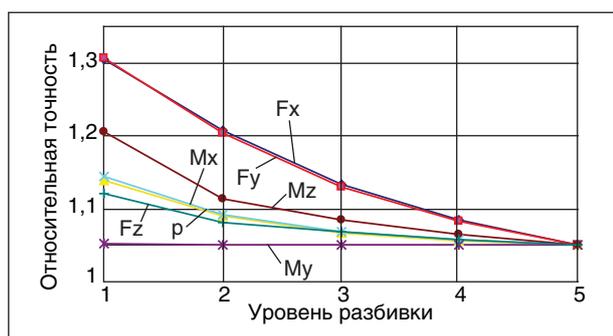


Рис. 5. Зависимость полученных результатов НДС от уровня разбивки

действия сил и моментов, минимальное – от давления. Влияние уровня разбивки возрастает при применении накладного кольца или при увеличении толщины обечайки относительно толщины патрубка.

Чтобы отразить влияние качества конечно-элементной разбивки на получаемые результаты, вводятся так называемые **коэффициенты разбивки**. Их значения получены на основании сравнительных расчетов, выполненных для различных узлов врезок. Для каждого уровня разбивки выбраны максимальные значения величин относительной точности.

Коэффициенты разбивки представляют собой дополнительный запас прочности при определении допускаемых напряжений для соответствующих уровней разбивки.

Ниже приведены принятые коэффициенты разбивки для различных уровней разбивки:

Уровень разбивки	Коэффициент разбивки
1	1,3
2	1,2
3	1,14
4	1,09
5	1,05

Для назначения допускаемых нагрузок, действующих на штуцер, необходимо провести расчеты по определению максимальных напряжений от действия единичных сил, моментов и давления поочередно. То есть при расчете от заданной единичной силы или момента все остальные нагрузки (включая давление) приравниваются к нулю. Для каждого вида напряжений (мембранных и общих) определяется минимальный запас прочности с учетом коэффициента разбивки. При определении допускаемой нагрузки его единичная величина умножается на полученный минимальный запас прочности.

Также определяются допускаемые нагрузки на штуцер при отсутствии давления. В этом случае допускаемые нагрузки определяются из условия, что при их *одновременном действии* на штуцер максимальные напряжения не превышают допускаемые. Практика расчетов показывает, что данное условие выполняется при величине нагрузок, равной 1/4 от допускаемых индивидуальных нагрузок.

При действии расчетного давления допускаемые нагрузки дополнительно уменьшаются на величину $(1 - p/[p])$, где p — расчетное давление; $[p]$ — допускаемая величина давления.

Полученные нагрузки формируют таблицу допускаемых нагрузок на штуцер при расчетном давлении, которая может быть рекомендована при назначении допускаемых нагрузок на штуцер в прочностных расчетах трубопроводных обвязок сосуда (аппарата).

Рассчитанные таким образом допускаемые нагрузки при расчетном давлении носят консервативный характер. Как правило, при их одновременном приложении с учетом давления максимальные напряжения составляют 50–80% от допускаемых величин. Поэтому при превышении допускаемых величин нагрузок для заключения

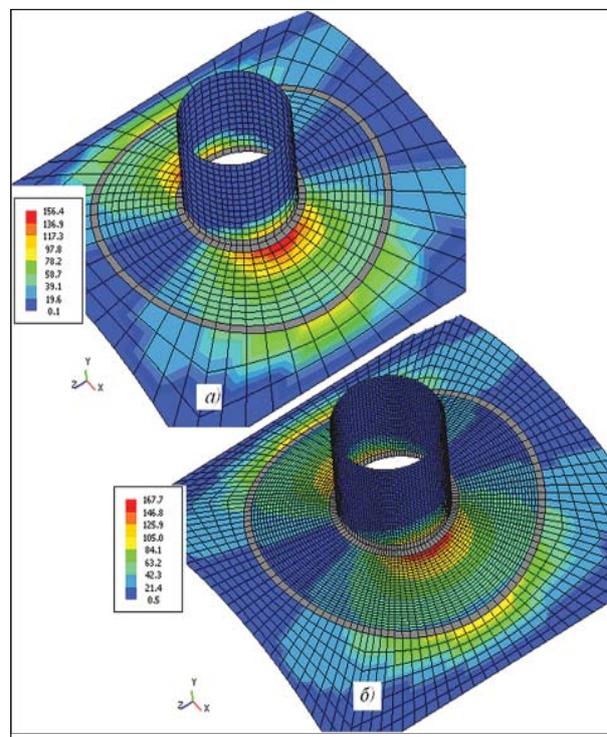


Рис. 5. Общие (мембранные и изгибные) напряжения на наружной поверхности (МПа) при разбивке по 1-му (а) и 5-му (б) уровням от действия момента $M_z = 10000$ Нм

о работоспособности врезки необходим дополнительный расчет с полученными нагрузками.

Жесткость (податливость) врезки определяется для точки приложения усилий (крышка штуцера) в каждом направлении в глобальной системе координат. При определении жесткости врезки суммарные прибавки не учитываются. Жесткость врезки определяется как отношение прикладываемых сил (моментов) к полученным соответствующим перемещениям (углам).

Программа «Штуцер-МКЭ» полностью реализует описанную методику и предлагает варианты расчетных моделей для расчета как сосудов (аппаратов) так и ответвлений трубопроводных магистралей, в том числе равнопроходных тройников.

Несущим элементом может быть:

- цилиндрическая обечайка горизонтального аппарата с закреплением по краям;
- цилиндрическая обечайка вертикального аппарата с закреплением нижней части;
- коническая обечайка;
- эллиптическое днище;
- полусферическое днище;
- плоское днище;
- магистраль трубопровода с закреплением одного конца и возможностью задания дополнительных нагрузок на другом.

Расчетные схемы штуцеров (ответвлений) включают возможность моделирования:

- проходящих и непроходящих штуцеров;
- накладных и вварных колец;
- задания внутренней части проходящего штуцера из другого материала;
- прямых и косых врезок.

При расчете может учитываться наличие коррозионной сероводородсодержащей среды. При этом дополнительно оцениваются растягивающие напряжения на внутренней поверхности узла врезки.

Внешние нагрузки могут задаваться в системах координат, связанных как с несущим элементом (магистралью), так и со штуцером.

Полученные напряжения обычно резко уменьшаются по мере удаления от зоны врезки, поэтому в Штуцер-МКЭ предусмотрена автоматическая неравномерная разбивка модели, более частая в области ожидаемой концентрации напряжений.

В качестве нормативного документа для оценки напряжений может использоваться [1] или [2] по выбору пользователя.

Кроме расчета по МКЭ в программе реализована возможность оценки прочности и жесткости радиальных штуцеров по [3–7], оценки прочности и устойчивости элемента, в который врезается штуцер, а также реализован расчет укрепления отверстия под действием только давления по нормативным документам [1].

Литература

1. ГОСТ Р 52857.(1-10)-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сборник стандартов.
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525с.
3. WRC-107 Welding Research Council. Bulletin. Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings, 1979.
4. WRC-297 Welding Reserch Council. Bulletin. Local Stresses in Cylindrical Shells due to External Loadings on Nozzles – Supplement to WRC Bulletin №107”, 1987.
5. BS-5500: 1976. Specification for Unfired fusion welded pressure vessels. British Standards Institution.
6. Bildy Les M. A Proposed Method for Finding Stress and Allowable Pressure in Cylinders with Radial Nozzles. PVP Vol. 399, ASME. — New York, 2000. — P. 77–82.
7. WRC-368 Welding Reserch Council. Bulletin. Stresses in Intersecting Cylinders subjected to Pressure, 1991. — 32 p.
8. РД 26.260.09–92. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность цилиндрических обечаек и выпуклых днищ в местах присоединения штуцеров при внешних статических нагрузках.
9. СА 0300407. Расчет на прочность сосудов и аппаратов.

A.N. Krasnokutsky, A.I. Timoshkin

Problems of Strength Analysis of Nozzle-shell Junctions

Different ways and methods of nozzle-shell junctions strength analysis, used in «Nozzle-FEM» software (developed by NTP Truboprovod), are discussed. Information on related regulation documents is given.

The specific details of finite element method (FEM) implemented in the software are described.

Calculation features of Nozzle-FEM program are presented.

Key words: *nozzle-shell junctions strength analysis, allowable loads, nozzle, vessel, apparatus, finite element method, Nozzle-FEM.*