

Совершенствование методики расчета резьбовых фланцевых и межфланцевых соединений

К. А. МЯГКОВ – Инженер ООО «Инженерно-расчетная компания «Проект»

Р. Ф. ГАФФАНОВ – к.т.н., ООО «Инженерно-расчетная компания «Проект»

Д. Ю. СЕРИКОВ – к.т.н., Доцент РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина

В данной статье рассмотрены существующие методики расчета фланцевого соединения, определены факторы, влияющие на напряженно-деформированное состояние деталей, входящих во фланцевое соединение и не учтенные в существующих методиках расчета. Показан вид компоновки существующих методик и виды компоновок с неучтенными факторами воздействия. Описана структура усовершенствования методик прочностного расчета. Обоснована применимость метода конечных элементов при исследовании фланцевых соединений.

Трубопроводная арматура является неотъемлемой частью всех трубопроводных систем, начиная от жилищно-коммунального хозяйства и заканчивая системами с повышенными требованиями к технической безопасности, к которым относятся:

- системы нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятий;
- системы водоснабжения тепловых электростанций;
- основные контуры атомной электростанции;
- системы в химическом производстве и переработка.

В данных отраслях промышленности предъявляются повышенные требования к прочности и надежности всех элементов арматуры, а в особенности фланцевых и резьбовых соединений. Фланец – основной элемент соединения трубопроводных конструкций, который обеспечивает прочное и плотное разъемное соединение. Требования к прочности, надежности арматуры и всех ее элементов регламентированы следующими методиками расчета [1, 3, 4, 5], анализ которых показал, что они не учитывают ряд факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние (НДС) деталей, входящих во фланцевое соединение.

Существующие методики расчета, применяемые в атомной и нефтегазовой промышленности при расчете усилий и напряжений в соединениях [1, 3], как правило, используют следующее соотношение (1):

$$F_w = F_{OW} + \chi F_p + F_T; \quad (1)$$

где:

F_{OW} – усилие начальной затяжки шпилек;

χ – коэффициент нагрузки (коэффициент податливости);

F_p – гидростатическое усилие в рабочих режимах;

F_T – усилие в шпильках, вызванное температурными перепадами;

F_w – усилие на шпильках в рабочих условиях.

Согласно проведенному анализу, существующие методики расчета учитывают следующие факторы:

- рабочее внутреннее давление P ;
- геометрические особенности деталей, входящих в сборку резьбового соединения;
- физико-механические свойства деталей (модуль продольной упругости и коэффициент линейного расширения), входящие в сборку резьбового соединения;
- среднюю температуру T на рассматриваемом участке (при определении величины усилий в шпильках, вызванных температурными перепадами).

Таким образом, существующие методики расчета справедливы для данного вида компоновки фланцевых соединений (рис. 1), где M_3 – момент затяжки шпилек.

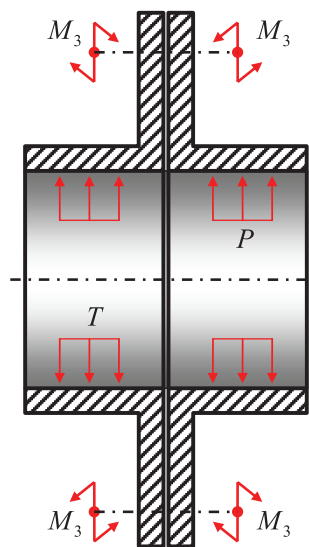


Рис. 1. Схема компоновки фланцевого соединения, рассматриваемого в существующих методиках расчета



Однако эти методики не учитывают некоторые виды механических воздействий для типов компоновок магистральных сетей, представленных на рис. 2 и рис. 3, где:

P – рабочее давление;

T – рабочая температура;

M_3 – момент затяжки шпилек;

M_T – весовой изгибающий и температурный моменты от трубопроводов;

F_T – растягивающее усилие от трубопровода;

$F_{3,0}$ – растягивающее усилие от следующей арматуры в момент полного закрытия запорного органа;

F_K – растягивающие и изгибающие воздействия от трубопровода, вызванные кривизной (коленом) трубопровода.

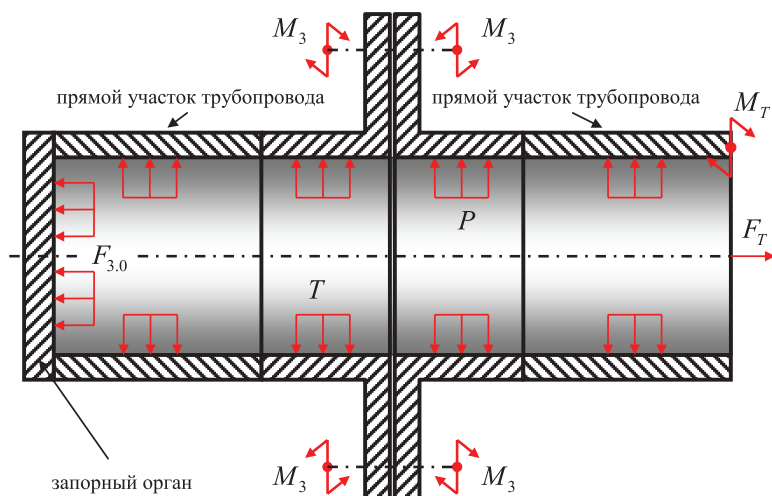


Рис. 2. Схема компоновки с присоединенной последовательно арматурой

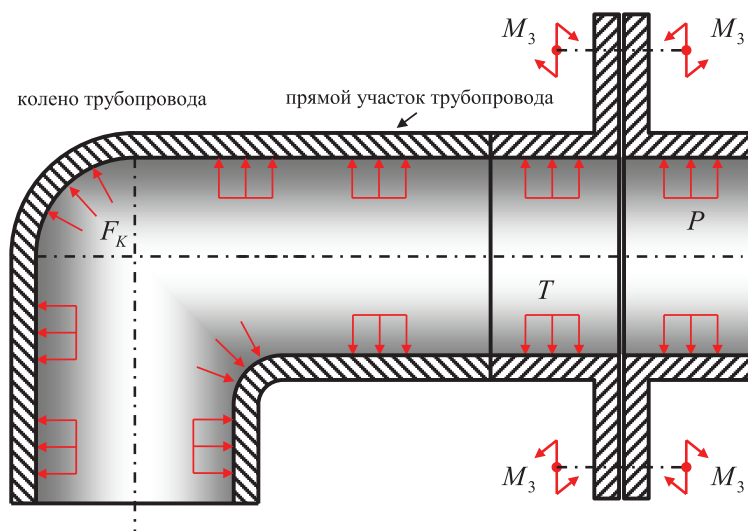


Рис. 3. Схема компоновки с коленом

Для данных типов компоновок существующие методики расчета не учитывают:

- весовые изгибающие моменты от трубопроводов;
- температурные моменты от трубопроводов;
- растягивающее воздействие от трубопровода;
- растягивающее воздействие от следующей арматуры в момент полного закрытия запорного органа (рис. 2);
- кривизну трубопровода (рис. 3);
- конвекцию и теплообмен между деталями входящими в сборку резьбового соединения.

Для учета всех дополнительных факторов внешнего воздействия на фланцевое соединение и совершенствования методики расчета необходимо решить ряд задач с использованием современных вариационных методик расчета [6, 7], теории тепло- и массообмена [7] и физики твердого тела [8].

С целью совершенствования методики расчета фланцевых соединений с учетом конструктивных особенностей трубопроводной системы необходимо решить ряд многосвязных термочностных и контактных задач с использованием современной теории вариационного исчисления метода конечных элементов (МКЭ). При этом прочностная задача должна учитывать:

- условие контактного взаимодействия сопрягаемых деталей;
- внешнее механическое воздействие от трубопровода;
- воздействие от трубопровода, вызванное вследствие его кривизны;
- воздействие давления среды с учетом конструктивных особенностей трубопроводных систем.

Термочностная задача должна учитывать:

- конвективное воздействие с окружающей средой;
- контактное взаимодействие в деталях.

Решением данных задач, станет обобщенная математическая модель, способная учесть тепловое взаимодействие трубопроводной системы с окружающей средой и конструктивные особенности трубопроводной системы любой конфигурации.

Для подтверждения возможности использования в решении последующих задач метода конечных элементов (МКЭ), был проведен сравнительный анализ результатов численного и аналитического решения задачи по определению напряжений в шпильках фланцевого соединения, вызванных от действия внутреннего рабочего давления среды.

При аналитическом анализе использовалась методика расчета, указанная в [1]. Согласно данной методике, для определения напряжений в шпильках, вызванных от действия внутреннего рабочего давления среды, используется следующее соотношение:

$$\sigma_w = \frac{F_p}{A_w * z}$$

где:

F_p – гидростатическое усилие в рабочих режимах;
 A_w – площадь поперечного сечения стержня шпильки;
 z – количество шпилек, участвующих во фланцевом соединении;
 σ_w – напряжение в шпильке в рабочих условиях.

Таблица 1.

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Величина
Внутреннее рабочее давление среды	P	МПа	4
Внутренний диаметр крышки	D	мм	200
Наружный диаметр резьбы шпильки	d_0	мм	27
Шаг резьбы шпильки	t	мм	3
Количество шпилек фланцевого соединения	z	шт.	12
Результаты расчета			
Площадь действия среды	$A = \frac{\pi * D^2}{4}$	мм ²	31416
Гидростатическое усилие в рабочих режимах	$F_p = P * A$	Н	125663,7
Внутренний диаметр резьбы шпильки	$d_1 = d_0 - t * 17 * \frac{\sqrt{3}}{24}$	мм	23,3
Площадь поперечного сечения стержня шпильки	$A_w = \frac{\pi * d_1^2}{4}$	мм ²	427,1
Напряжение в шпильке в рабочих условиях	σ_w	МПа	24,52

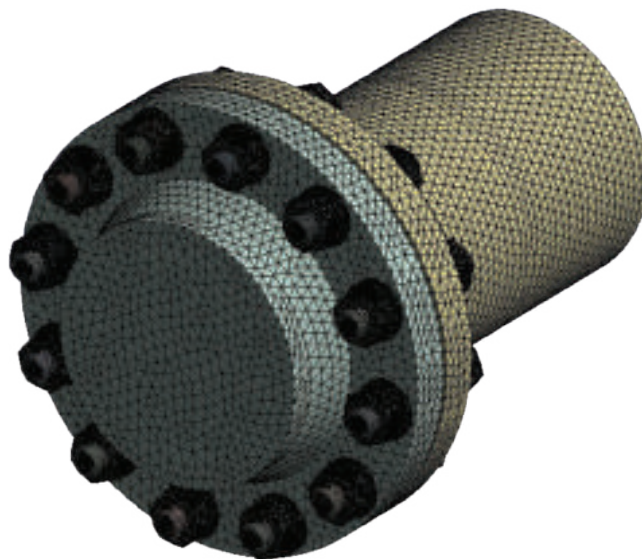


Рис. 4. Конечно-элементная сетка расчетной области

Таблица 2.

Напряжение в шпильке в рабочих условиях, рассчитанное по методике [1]	σ_{w1}	МПа	24,52
Напряжение в шпильке в рабочих условиях, рассчитанное в программном комплексе	σ_{w2}	МПа	25,289
Погрешность результатов	$100 - \frac{\sigma_{w1}}{\sigma_{w2}} * 100$	МПа	3,04

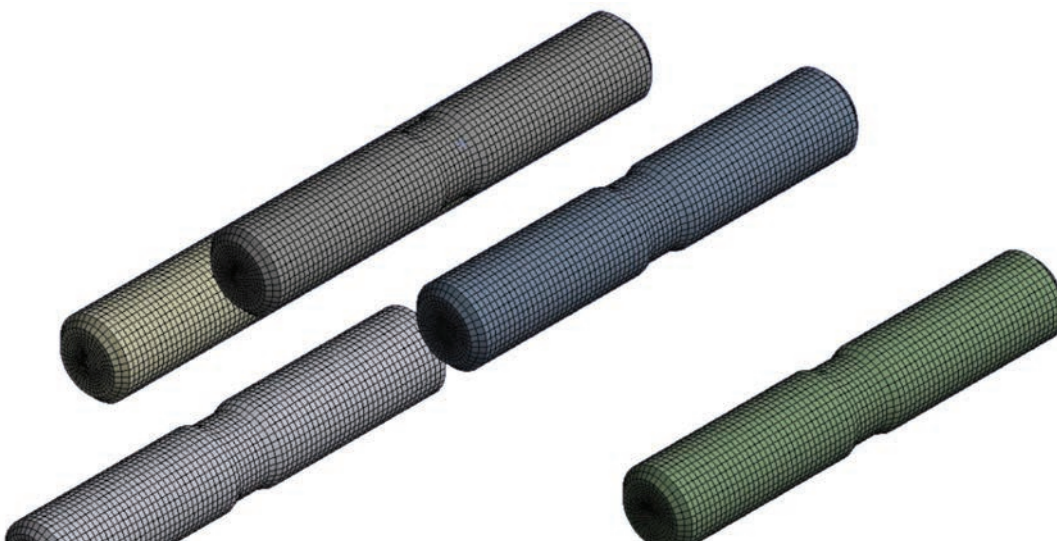


Рис. 5. Конечно-элементная сетка шпилек



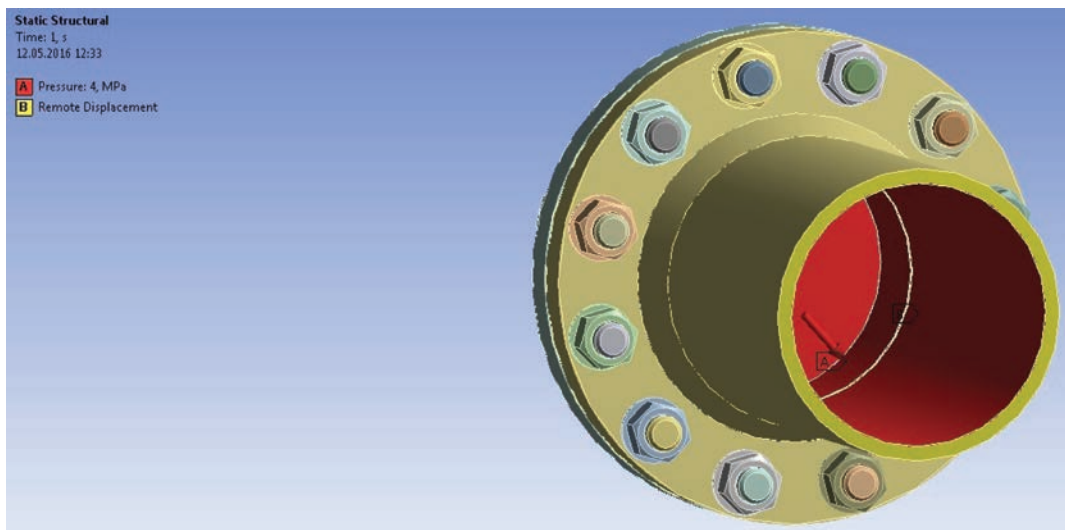


Рис. 6. Заданные граничные условия

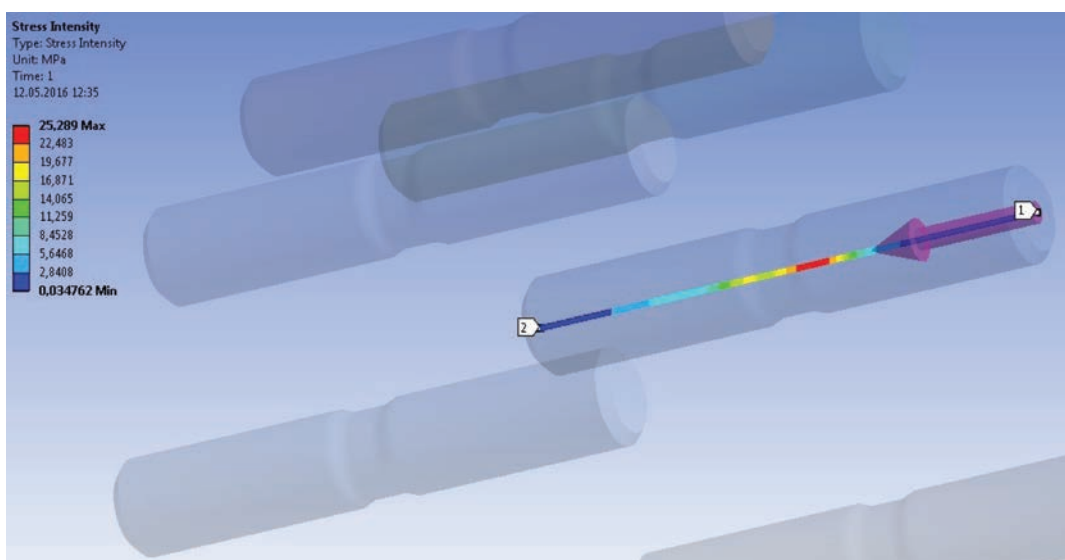


Рис. 7. Распределение приведенных напряжений по стержню шпильки, МПа

В анализе использовались исходные данные, представленные в табл. 1.

Численный анализ был проведен при помощи программного комплекса Ansys Work Bench в модуле Static Structural. Общий вид расчетной области, конечно-элементная сетка расчетной области и шпилек, заданные граничные условия представлены на рис. 4, 5, 6 и 7 соответственно.

Результаты аналитического и численного анализа представлены в сводной табл. 2.

Таким образом, величина погрешности расчетов численным и аналитическим методом, свидетельствует о возможности проводить исследование с использованием современных средств вычислений, учитывая максимально возможное количество факторов, влияющих на прочность фланцевого соединения.

Литература:

1. ПНАЭ Г. 7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат. 1989.
2. ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭУ. – М., Энергоатомиздат, 1990.
3. ГОСТ Р 52857.4-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. М.: Стандартиформ. 2009.
4. Д. Ф. Гуревич. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. Ленинград: Машиностроение. 1969.
5. В. И. Анурьев. Справочник конструктора- машиностроителя, том 2. М.: Машиностроение. 2001.
6. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / пер. с англ. под ред. Б. Е. Победрди. – М.: Мир, 1975.
7. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / под ред. Б. Е. Поберди. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
8. С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. Теория упругости / пер. с англ. под ред. Г. С. Шапира. М.: Наука. 1975. ●