

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Факультет «Аэрокосмический»  
Кафедра «Техническая механика»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, к.т.н.

\_\_\_\_\_ П.А. Тараненко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Сопоставление применения различных Норм прочности на примере расчета корпуса  
задвижки

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ–150303.19.036.00 ПЗ ВКР

Руководитель НИР,

проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ А.О. Чернявский

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Автор проекта

студент группы П-429

\_\_\_\_\_ А.В.Татаринов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Нормоконтролер,

доцент, к.т.н., с.н.с.

\_\_\_\_\_ Ю.Н. Ребяков

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

## АННОТАЦИЯ

Татаринов А.В. Сопоставление применения различных Норм прочности на примере расчета задвижки. – Челябинск: ЮУрГУ, П–429, 41 с., 9 ил., 12 табл., библиогр. список – 17 наим., презентация.

Выпускная квалификационная работа выполнена с целью сопоставления норм прочности на примере расчета заданного компонента конструкции.

Теоретические методы исследования основаны на изучении российских стандартов ПНАЭ Г 7-002-86 и американского кода ASME BPVC.

Экспериментальная часть работы включает в себя компьютерный анализ напряженного состояния и деформаций компонента трубопровода на примере задвижки ЗМС-50х35.01РР с использованием программного продукта SolidWorks Simulation, Ansys и системы Mathcad.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						<i>2</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

## Содержание

Введение .....	4
1. Методологии, положенные в основу расчетов на прочность .....	6
1.1 Этапы расчетов .....	6
1.2 Допускаемые напряжения. Категоризация напряжений .....	10
2. Оценка статической прочности .....	19
2.1 Объект исследования .....	19
2.2 Метод расчета элементов оборудования, находящихся под давлением, в стандартах ПНАЭ-Г-7-002-86 .....	21
2.3 Изучение методов расчета элементов оборудования, находящихся под давлением, в стандартах ASME BPVC-2015 .....	25
2.3.1 Метод анализа упругих напряжений .....	28
2.3.2 Метод анализа напряжения, соответствующего упругопластической деформации .....	33
Заключение .....	40
Список литературы .....	41

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						3
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

## Введение

Для анализа прочности сосудов давления применяется ряд нормативных документов. Обычно в каждой отрасли принят свой набор документов. Так, в атомной энергетике расчеты сосудов на прочность регламентируются «Нормами расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86», в общем машиностроении – ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность, в нефтехимической отрасли – РД 26-02-62-98 Расчет на прочность элементов сосудов и аппаратов, работающих в коррозионно-активных сероводородо-содержащих средах (Руководящий документ ВНИИНЕФТЕМАШ) и др. До недавнего времени эти документы являлись документами обязательного применения (и являются таковыми до сих пор в атомной энергетике).

В США ситуация несколько отличается. Документы по расчетам на прочность формально не являются обязательными, применение их регулируется только экономически. Конструкции (сосуды), удовлетворяющие требованиям соответствующих документов, продаются дороже и страхуются (на случай аварии) по гораздо меньшей ставке; при этом подтверждение соответствия требованиям норм строго регламентировано. Документом, регулирующим расчеты на прочность сосудов, является ASME BPVC Секция VIII Нормы на котлы и сосуды высокого давления.

Кроме того, во многих странах существуют свои реализованные нормы по расчетам прочности и жесткости трубопроводов, таких как:

Британские: BS 806, BS 7159,

Немецкие: FBDR,

Французские: CODETI,

Норвежские: ТВК 5-6,

Европейские: EN-13480 и т.д.

Проблема заключается в том, что все перечисленные нормы весьма разнородны по своему статусу и не образуют единой системы.

В данной выпускной работе требования кода ASME BPVC были

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						4
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

сопоставлены со стандартами ПНАЭ Г 7-002-86. Такой выбор определялся следующими причинами:

- указанные стандарты открыты (в отличие, например, от авиационных документов);
- применяются не только в атомной энергетике, но и во множестве других отраслей).

Структура документов серии PNAE G-7 и Кодекса ASME существенно различаются. Этот аспект делает очень трудным, если не практически невозможным, оценку и определение полного соответствия между серией PNEG-7 и Кодексом ASME.

При решении поставленных задач в работе использованы теоретические и экспериментальные методы научного познания.

Общенаучные теоретические методы исследования основаны на базовых положениях таких нормативных документов, как «ГОСТ Р 52857.1-2007» -«ГОСТ Р 52857.12-2007», «ГОСТ 17032-2010», «ТР ТС 032/2013», «ГОСТ 14249-89», «ОСТ Р 52857.10-2007», «ПБ 03-605-03», «РД 24.200.17-90», «РД 26-01-169-89» и т.д.

Помимо теоретического литературного обзора был проведен компьютерный анализ напряженного состояния и деформаций компонента трубопровода на примере задвижки ЗМС-50х35.01РР с использованием программного продукта SolidWorks Simulation, Ansys и системы Mathcad.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						5
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

# 1. Методологии, положенные в основу расчетов на прочность

## 1.1 Этапы расчетов

Существующие методики прочностного расчета оборудования предназначены для оценки надежности как технологической системы в целом, так и отдельных ее частей, и распространяют свое действие на конкретные категории, типы и группы конструкции в зависимости от условий эксплуатации.

Расчет на прочность оборудования по ПНАЭ Г-7-002-86 проводят в два этапа:

- 1) расчет по выбору основных размеров;
- 2) поверочный расчет.

Расчет по выбору основных размеров направлен на исключение разрушения элементов конструкций при однократном нагружении (только). Рассматриваются элементы конструкций, изготовленные из достаточно пластичных металлических материалов; предполагается, что пластических свойств достаточно для полного перераспределения напряжений. Поэтому в качестве расчетных формул используются формулы безмоментной теории оболочек, не учитывающие изгиб и концентрацию напряжений.

После расчета по выбору основных размеров проводят поверочный расчет, дающий оценку прочности по допускаемым напряжениям, деформациям и коэффициентам интенсивности напряжения, в зависимости от типа конструкции, характера нагружения, вида действующих напряжений и режима работы. Эти расчеты должны быть выполнены для всех режимов нагружения с проверкой всех условий прочности (предельных состояний).

В основу принятых в Нормах методов расчета положены принципы оценки по следующим предельным состояниям:

- 1) кратковременное разрушение (вязкое и хрупкое);
- 2) разрушение в условиях ползучести при статическом нагружении;
- 3) пластическая деформация по всему сечению детали;

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						6
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

- 4) накопление предельно допустимой деформации ползучести;
- 5) циклическое накопление пластической деформации, которое приводит к недопустимому изменению размеров или квазистатическому разрушению;
- 6) возникновение макротрещин при циклическом нагружении;
- 7) потеря устойчивости.

Основные расчетные случаи:

- нормальные условия эксплуатации (НУЭ);
- нарушение нормальных условий эксплуатации (ННУЭ);
- аварийные ситуации (АС).

В НУЭ (нормальные условия эксплуатации) входит ряд режимов:

- затяг болтов и шпилек;
- пуск – эксплуатационный режим, в процессе которого внешние нагрузки и температуры меняются от начальных значений до значений, соответствующих стационарному режиму;
- стационарный режим – эксплуатационный режим, при котором внешние нагрузки и температура остаются постоянными в пределах  $\pm 5\%$  номинальных значений;
- гидро- и пневмоиспытание – пробное нагружение оборудования или трубопроводов внутренним или наружным давлением с целью проверки их сплошности после изготовления, монтажа, определенного периода эксплуатации или ремонта.

Нагрузки при нарушении нормальной эксплуатации и возникновении аварийной ситуации задаются конструктором для каждого аппарата в отдельности.

По результатам поверочного расчета уточняется геометрическая форма конструкции, определяются допустимое число циклов нагружения и ресурс эксплуатации.

Этапы прочностного расчета по стандартам ASME BPVC-2015 включают в себя:

- 1) Требования к проектированию по нормам (Design by rule requirements).
- 2) Правила расчетного анализа (Design by analysis requirements).

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						7
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Требования к проектированию по нормам (Design by rule requirements) ASME BPVC содержат проектные нормы для общепотребительных форм сосудов, работающих под давлением, а также правила или указания по обращению с другими нагрузками в установленных пределах.

Правила аналитического проектирования (Design by analysis requirements) основаны на использовании результатов, полученных из детального анализа напряжений компонента для оценки его сопротивляемости пластическому разрушению, местному разрушению, изгибанию и циклической нагрузке.

Требование выполнения расчетного анализа относится ко всем элементам конструкций и предусматривает защиту от следующих видов разрушений (п.5.1.1.2 [ссылка: ASME BPVC 2015 Section VIII part 2]):

1) предельное равновесие – состояние, при котором небольшому увеличению нагрузки соответствует большое (теоретически – бесконечно большое) увеличение деформаций и перемещений;

2) защита от локального разрушения (сюда входит как вязкое разрушение – исчерпание ресурса пластичности, так и хрупкое разрушение – распространение трещины);

3) защита от разрушения из-за потери устойчивости (для сжатых элементов конструкции, например, сосудов, на которые действует наружное давление, превышающее внутреннее);

4) защита от отказов, вызванных циклическими нагрузками.

Согласно нормам ASME VIII, раздел 1 UG-22 в процессе проектирования должны быть учтены следующие нагрузки:

1) Внутреннее или внешнее расчетное давление. Каждый элемент сосуда давления должен рассчитываться так, чтобы выдерживать, как минимум, самый тяжелый режим совпадения давления и температуры, ожидаемый при нормальной эксплуатации. Для такого режима и для режимов испытаний нужно учитывать максимальную разность давлений между внутренней и внешней сторонами сосуда или между двумя любыми камерами комбинированной установки.

2) Вес сосуда и нормальное заполнение в условиях эксплуатации или

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8



испытаний (при этом учитывается дополнительное давление под действием статического напора жидкости).

3) Наложённые статические реакции под действием веса прикрепленного оборудования, такого как моторы, механизмы, другие сосуды, трубы, облицовка и изоляция.

4) Нагрузки от крепления.

5) Циклические и динамические реакции под действием колебания давления или температуры, а также под действием оборудования, установленного на сосуде, и механических нагрузок.

6) Ветровые, снеговые и сейсмические реакции, если они имеют место;

7) Реакции на удар, например, в связи с гидравлическими ударами;

8) Температурные градиенты и различное тепловое расширение;

9) отклоняющееся от нормы давление, например, вызванное выбросами пламени.

Методология аналитического проектирования является инструментом, необходимым для получения достоверных результатов в отношении развития условий нагрузки, выбора свойств материалов, последующей обработки результатов и сравнения с приемлемыми критериями, с целью определения пригодности компонента.

Сравнительная характеристика этапов расчетов и предельных состояний, положенные в основу методов расчета по Нормам и ASME BPVC приведены в таблице 1.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						9
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Таблица 1 – Этапы расчета и оценка по предельным состояниям компонента

Этапы расчета	
<b>ПНАЭ Г-7-002-86</b>	<b>ASME BPVC 2015</b>
Расчет по выбору основных размеров	Проектирование по нормам (Design by rule requirements)
Поверочный расчет	Проектирование на основе анализа (Design by analysis requirements)
Предельные состояния	
<b>ПНАЭ Г-7-002-86</b>	<b>ASME BPVC 2015</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- кратковременное разрушение (вязкое);</li> <li>- разрушение в условиях ползучести (при статическом нагружении);</li> <li>- пластическая деформация по всему сечению;</li> </ul>	- защита от пластического разрушения (Plastic Collapse);
<ul style="list-style-type: none"> <li>- накопление предельно допустимой деформации ползучести;</li> <li>- хрупкое кратковременное разрушение;</li> </ul>	- защита от локального разрушения (Local Failure);
<ul style="list-style-type: none"> <li>- циклическое накопление пластической деформации;</li> <li>- возникновение макротрещин при циклическом нагружении;</li> </ul>	- защита от отказов, вызванных циклическими нагрузками (Failure From Cyclic Loading);
<ul style="list-style-type: none"> <li>- потеря устойчивости.</li> </ul>	- потеря устойчивости (Collapse From Buckling).

## 1.2 Допускаемые напряжения. Категоризация напряжений

### ПНАЭ Г-7-002-86

Высоконагруженные конструкции не удастся проектировать без использования пластических свойств материала. Перераспределение напряжений вследствие возникновения пластических деформаций позволяет конструкции задействовать те зоны, которые изначально (в упругом состоянии) были нагружены слабо. Использование этих резервов повышает несущую способность конструкции, в некоторых случаях (особенно – при больших тепловых нагрузках) конструкций

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>10</i>

вообще не может быть спроектирована без пластических деформаций.

Нормы ПНАЭ-Г 7-002-86 были написаны в то время, когда методы расчета за пределами упругости встречались в исследовательских работах, но не были доведены до состояния инструмента, которым мог бы пользоваться инженер в повседневной деятельности. Поэтому в Нормах принята упрощенная методика:

- расчеты напряжений выполняются в пределах упругости, без учета возможности появления пластических деформаций;
- перераспределение напряжений за счет пластичности учитывается упрощенно: назначением разных коэффициентов запаса для напряжений, по-разному распределенных в конструкции.

Иллюстрация к такому подходу показана на рис.1. При растяжении напряжения по сечению стержня распределены равномерно, и предельная нагрузка (при которой деформации становятся неограниченными) совпадает с нагрузкой появления первой пластической деформации. При изгибе появление первой пластической деформации в наиболее нагруженной точке не означает еще предельного состояния: за счет перераспределения напряжений конструкция еще может работать. Предельная нагрузка здесь для стержня прямоугольного сечения в 1.5 раза превышает нагрузку, при которой появляется первая пластическая деформация.

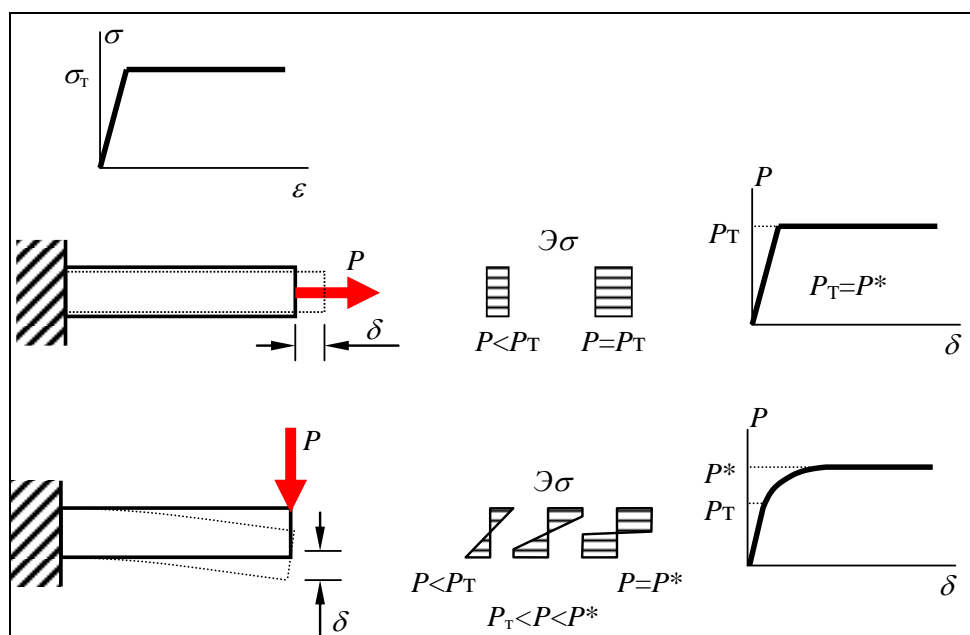


Рис.1 – Предельные нагрузки и пластические деформации при растяжении и изгибе

В соответствии с этим подходом напряжения в ПНАЭ-Г-7-002-86 разделены на мембранные и изгибные, каждая из них в свою очередь – на местные и общие. Кроме того, отдельно выделены температурные напряжения (поскольку в пластичном материале эти напряжения сами по себе не могут вызвать разрушения) и пиковые напряжения (слагаемое, дополняющее сумму мембранных и изгибных напряжений до полных – с учетом возможного нелинейного распределения напряжений по сечению). Категории напряжений группируются, разным группам назначаются разные коэффициенты запаса.

Естественно, этот подход применяется только для анализа прочности при однократном нагружении (первое нагружение конструкции или длительная работа на стационарном режиме).

В качестве основных характеристик материалов, используемых при определении значений допускаемых напряжений, приняты *временное сопротивление, предел текучести, предел длительной прочности и предел ползучести*. Допускаемые напряжения установлены по указанным характеристикам введением соответствующих запасов прочности, которые используется главным образом как способ сравнения надежности вновь создаваемого элемента конструкции и подобных элементов, длительное время находящихся в эксплуатации.

Номинальные допускаемые напряжения определяют по характеристикам материала при расчетной температуре. Номинальные допускаемые напряжения для элементов с расчетной температурой, равной  $T_t^1$  или ниже ее, рассчитывают по пределу текучести и временному сопротивлению. Для углеродистых, легированных и высокохромистых сталей  $T_t$  равна  $350^\circ\text{C}$ .

В ПНАЭ Г-7-002-86 номинальное допускаемое напряжение для элементов оборудования и трубопроводов, нагруженных давлением, принимают минимальным из следующих значений:

<sup>1</sup>  $T_t$  – температура, при превышении которой необходимо учитывать характеристики длительной прочности, пластичности и ползучести.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	Лист
						12
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_m^T}{n_m}; \frac{R_{p0,2}^T}{n_{0,2}}; \frac{R_{mt}^T}{n_{mt}} \right\}, \quad (1)$$

где  $n_m = 2,6$  – коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению;

$n_{0,2} = 1,5$  – коэффициент запаса прочности по пределу текучести;

$n_{mt} = 1,5$  – коэффициент запаса по пределу длительной прочности;

$R_m^T$  – минимальное значение временного сопротивления при расчетной температуре;

$R_{p0,2}^T$  – минимальное значение предела текучести при расчетной температуре;

$R_{mt}^T$  – минимальный предел длительной прочности за время  $t$  при расчетной температуре.

При проведении поверочного расчета используют следующие основные категории напряжений:

$\sigma_m$  – общие мембранные напряжения, вызываемые действием механических нагрузок, нормальные к рассматриваемому сечению, распределенные по всему сечению и равные среднему значению напряжений в данном сечении.

$\sigma_{mL}$  – местные мембранные напряжения;

$\sigma_b$  – общие изгибные напряжения, вызываемые действием давления и механических нагрузок, меняющиеся от максимального положительного значения до минимального отрицательного значения по всему сечению и приводящие к изгибу корпуса сосуда или трубопровода в целом.

$\sigma_{bL}$  – местные изгибные напряжения, вызываемые действием краевых сил и моментов от механических нагрузок;

$\sigma_T$  – общие температурные напряжения, возникающие от неравномерного распределения температур по объему элемента или из-за различия коэффициентов линейного расширения материалов, приводящие в предельном случае к недопустимым остаточным изменениям формы и размера конструкции;

$\sigma_{TL}$  – местные температурные напряжения, возникающие от неравномерного

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						13
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

распределения температур по объему элемента или из-за различия коэффициентов линейного расширения материалов, которые не могут вызвать недопустимых остаточных изменений формы и размеров конструкции;

$\sigma_k$  – напряжения компенсации, вызываемые стеснением свободного расширения трубопроводов или труб.

При проведении поверочного расчета определяют напряжения каждой расчетной группы категории напряжений, по которым определяют приведенные напряжения, сопоставляемые с соответствующими допускаемыми напряжениями. Группы категорий напряжений применительно к рассчитываемым зонам конструкции приведены в табл.2.

Таблица 2 – Группы напряжений в рассчитываемой зоне конструкции

Рассчитываемая зона	Вид нагружения	Категория определяемых напряжений	Расчетная группа категорий напряжений
Зона соединения фланца с цилиндрической частью корпуса	Внутреннее давление	Местные мембранные	$(\sigma)_2$
	Внутреннее давление, поле температур во фланце, поле температур в цилиндрической части корпуса, усилия затяга	Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные	$(\sigma)_{RV}$
		Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные + местные напряжения в зонах концентрации	$(\sigma_{aF})_V$

Используемые при расчетах на статическую и циклическую прочность группы категорий напряжений в конструкциях приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Примеры групп категорий в конструкциях

Тип конструкции	Расчетная группа категорий напряжений	Обозначение расчетной группы напряжений	Обозначение составляющих категорий напряжений, входящих в данную расчетную группу
Корпуса реакторов, парогенераторов и сосудов	Приведенные общие мембранные напряжения	$(\sigma)_1$	$\sigma_m$
	Приведенные напряжения, определяемые по суммам составляющих общих и местных мембранных и общих изгибных напряжений	$(\sigma)_2$	$[\sigma_m \text{ или } \sigma_{mL}] + \sigma_b$
	Размах приведенных напряжений, определяемый по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих температурных и компенсационных напряжений	$(\sigma)_{RV}$	$[\sigma_m \text{ или } \sigma_{mL}] + \sigma_b + \sigma_{bL} + \sigma_T + [\sigma_{km} \text{ или } \sigma_{kmL}] + \sigma_{kb} + \tau_{ks}$
	Амплитуда приведенных напряжений, определяемая по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих и местных температурных и компенсационных напряжений с учетом концентрации напряжений	$(\sigma_{aF})_V$	$[\sigma_m \text{ или } \sigma_{mL}] + \sigma_b + \sigma_{bL} + \sigma_T + \sigma_{TL} + [\sigma_{km} \text{ или } \sigma_{kmL}] + \sigma_{kb} + \tau_{ks}$ с учетом концентрации напряжений.

Примеры запасов прочности (разных для разных групп напряжений) приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Допускаемые значения для групп напряжений

Тип конструкции	Расчетный случай	$(\sigma)_1$	$(\sigma)_2$	$(\sigma)_{RV}$
Элементы корпусов реакторов, парогенераторов, сосудов	НУЭ	$[\sigma]$	$1,3[\sigma]$	$(\sigma)_{RV} = \left( 2,5 - \frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T} \right) \cdot R_{p0,2}^T$ но не более $2R_{p0,2}^T$
	ННУЭ	$1,2[\sigma]$	$1,6[\sigma]$	–
	АС	$1,4[\sigma]$	$1,8[\sigma]$	–
Трубопроводы	НУЭ	$[\sigma]$	$1,3[\sigma]$	–
	ННУЭ	$1,2[\sigma]$	$1,6[\sigma]$	

#### ASME BPVC – 2015

Допускаемые по проекту напряжения материала корпуса согласно API6A/ISO 10423, раздел 4.3.3.2 должны ограничиваться следующим критерием (2):

$$S_m = \min \left\{ \frac{2}{3} S_y; \frac{1}{2} S_u \right\} \quad (2)$$

где  $S_m$  – Расчетная величина допускаемого напряжения;

$S_y$  – Минимальный предел текучести материала;

$S_u$  – Минимальный предел прочности.

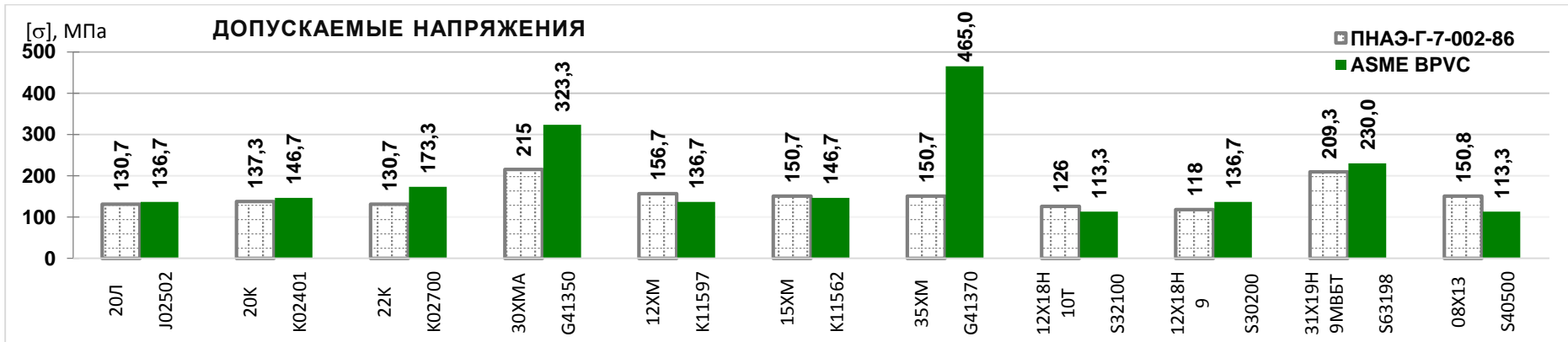
Легко видеть, что формула (2) аналогична формуле (1), коэффициенты запаса по пределу текучести одинаковы в обеих формулах и равны 1.5, а запасы по пределу прочности различаются: 2.6 в ПНАЭ-Г-7-002-86 и 2.0 в ASME BPVC.

Допускаемые напряжения для некоторых отечественных видов сталей и их зарубежных аналогов приведены в таблице 4.



Таблица 4 – Допускаемые напряжения для некоторых отечественных видов сталей и их зарубежных аналогов

Сталь	ПНАЭГ	$R_m^T$	$R_{p0,2}^T$	$[\sigma]$	ASME BPVC		$S_u$	$S_y$	S
Углеродистая	20Л	412	196	130,7	J02502	SA-216	415	205	136,67
	20К	397	206	137,3	K02401	SA-515	415	220	146,67
	22К	430	196	130,7	K02700	SA-516	485	260	173,33
Легированная	30ХМА	559	373	215	G41350	SA-372	825	485	323,33
	12ХМ	432	235	156,7	K11597	SA-335	415	205	136,67
	15ХМ	431	226	150,7	K11562	SA-335	415	220	146,67
	35ХМ	451	226	150,7	G41370	SA-372	930	760	465,00
Хромоникелевые коррозионно-стойкие аустенитного класса	12Х18Н10Т	461	189	126,0	S32100	SA-312	485	170	113,33
	12Х18Н9	412	177	118,0	S30200	SA-240	515	205	136,67
	31Х19Н9МВБТ	569	314	209,3	S63198	SA-453	665	345	230,00
Высоколегированные	08Х13	392	275	150,8	S40500	SA-240	415	170	113,33



Изм.	Лист	№ Документа	Подпись	Дата
------	------	-------------	---------	------

ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР

Лист

17

Допускаемые напряжения, используемые в данном разделе для всех видов материалов, приводятся соответственно в:

- 1) ПНАЭ-Г-7-002-86, Приложение 1 – Физико-механические свойства конструкционных материалов
- 2) ASME Section II Materials Part D, Table 5.

Таблица 5 – Категоризация напряжений и условия прочности

Категория напряжений		
ПНАЭ Г-7-002-86	ASME BPVC	Название категории
$(\sigma)_m$	$P_m$	Общее начальное мембранное
$(\sigma)_{mL}$	$P_L$	Локальное начальное мембранное
$(\sigma)_b$	$P_b$	Начальное изгибное
Группа категорий напряжений и условия прочности		
ПНАЭ Г-7-002-86		ASME BPVC
$(\sigma)_1 \leq [\sigma]$	$(\sigma)_m$	$P_m \leq S$
$(\sigma)_2 \leq 1,3 \cdot [\sigma]$	$[\sigma_m \text{ или } \sigma_{mL}] + \sigma_b$	$P_L + P_b \leq 1,5 \cdot S$

## 2. Оценка статической прочности

### 2.1 Объект исследования

Объектом исследования являются нормативные документы по расчетам на прочность: требования к методикам расчетов и методикам интерпретации результатов (вынесения решения о возможности эксплуатации конструкции).

Сопоставление документов проводится на примере расчета конкретной конструкции - корпуса задвижки ЗМС-50х35.01РР DN 50 (рис.1). Задвижка предназначена для эксплуатации в качестве запорного устройства на фонтанной арматуре скважин. Корпус задвижки находится под действием высокого внутреннего давления (расчетное давление PN 35 МПа), нагрузок от присоединенных трубопроводов, относительно невысокой температуры (температура рабочей среды до 100°C).

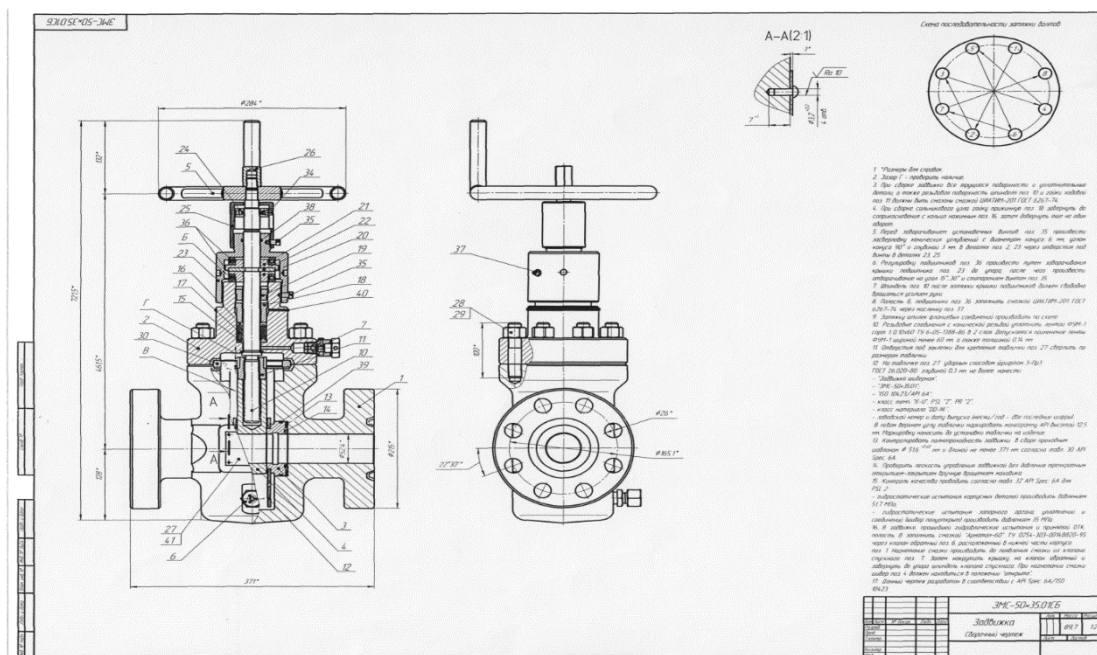


Рисунок 1 – Сборочный чертеж задвижки ЗМС-50х35.01РР

Рекомендуемые величины нагрузок, передающихся от трубопроводов на патрубки арматуры взяты из базы нормативной документации НП-068-05 «Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования». Параметры эксплуатации задвижки приведены в таблице 6.

Изм.	Лист	№ Документа	Подпись	Дата	ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР	Лист 19

Таблица 6 – Параметры эксплуатации

Момент от присоединенных трубопроводов Мв, кН·м	Сила, действующая на задвижку со стороны трубопровода Fв, Н	Рабочее давление, Мпа	Температура, °С
0,951	68720	35	100

В CAD-системе Solidworks была построена 3D-модель задвижки, а затем импортирована в ANSYS (рис.2).

Конечно-элементная модель.

Граничные условия:

– отсутствие вертикальных перемещений, приложенных к болтовой поверхности фланца;

Нагрузки:

- давление, приложенное ко всем внутренним поверхностям;
- для корпуса дополнительно – изгибающий момент и сила, действующие на задвижку со стороны трубопровода.

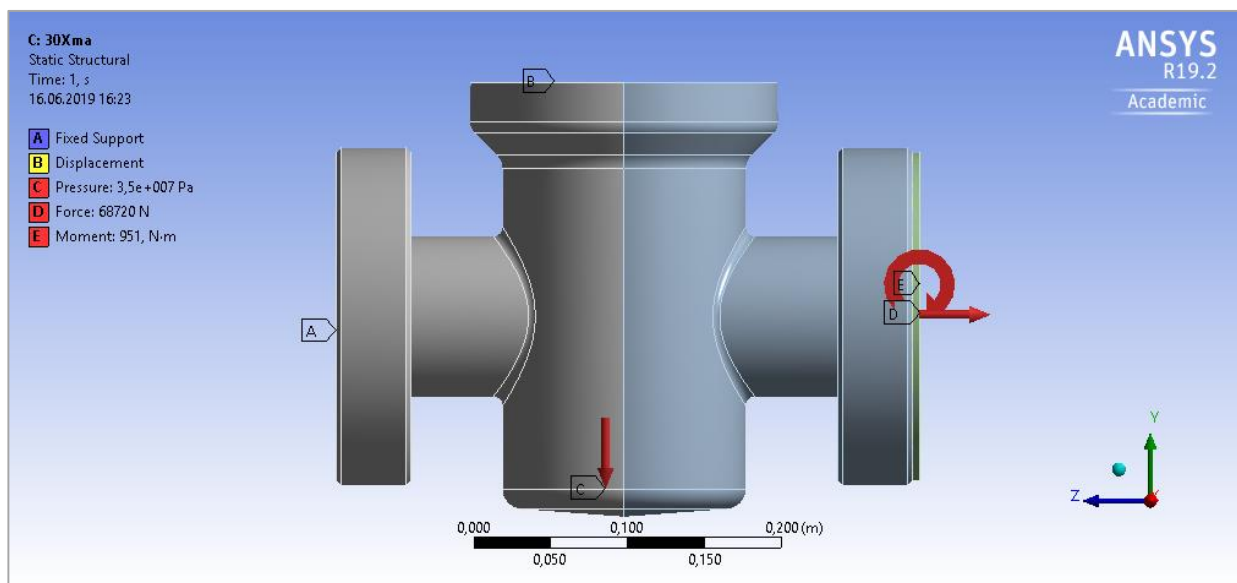


Рисунок 2 – Расчетная схема ЗМС-50х35.01PP

Исходные данные.

Корпус штампованный выполнен из стали 30ХМА по ГОСТ 4543–71. В качестве материала корпуса задвижки конструктором выбрана сталь 30ХМА (жаропрочная хромомолибденовая сталь с высоким сопротивлением ползучести и релаксации, зарубежный аналог – Сталь G41350, США). При поверочном расчете

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	Лист
						20
Изм.	Лист	№ Документа	Подпись	Дата		

использованы физико-механические свойства основного металла и сварных швов, указанные в государственных или отраслевых стандартах или технических условиях (табл.7).

Таблица 7 – Физико-механические свойства материала 30ХМА

T, C°	E·10 <sup>5</sup> , МПа	R <sub>m</sub> <sup>T</sup> , МПа	R <sub>p0,2</sub> <sup>T</sup> , МПа	α·10 <sup>6</sup> , 1/C°	ρ, кг/м <sup>3</sup>
20	2,08	589	392	11,5	7820
100	2,07	559	373	11,6	7800

При работе корпус нагружен внутренним рабочим давлением 35 МПа. Контрольное давление при испытании – 51,7 МПа.

## 2.2 Метод расчета элементов оборудования, находящихся под давлением, в стандартах ПНАЭ-Г-7-002-86

Метод, применяемый для определения расчетных нагрузок, внутренних усилий, перемещений, напряжений и деформаций рассчитываемых элементов, должен учитывать все расчетные нагрузки для всех расчетных случаев и давать возможность определить все необходимые расчетные группы категорий напряжений.

Основными расчетными нагрузками являются:

- 1) внутреннее или наружное давление;
- 2) масса изделия и его содержимого;
- 3) дополнительные нагрузки (масса присоединенных изделий;
- 4) изоляции трубопроводов и т. п.);
- 5) усилия от реакции опор и трубопроводов;
- 6) температурные воздействия;
- 7) вибрационные нагрузки;
- 8) сейсмические нагрузки.

Основное допускаемое напр. по ПНАЭ-Г определяется пределом прочности и запасом по нему.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						21
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{559}{2,6}; \frac{373}{1,5} \right\} = \min \{215; 248,66\} = 215 \text{ МПа}$$

После загрузки твердотельной модели в программный комплекс ANSYS был выполнен анализ НДС исследуемого компонента.

Конечно-элементное моделирование узла осуществлялось с использованием трехмерного 10-ти узлового элемента Solid187-3-D 10-Node Tetrahedral Structural Solid.

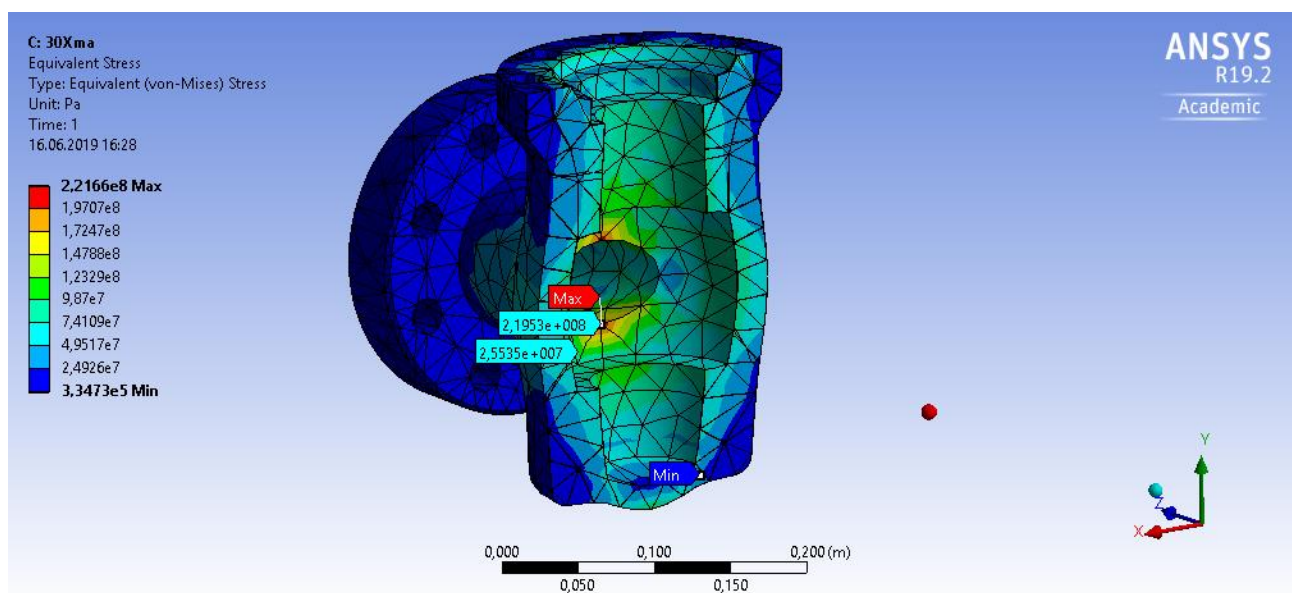
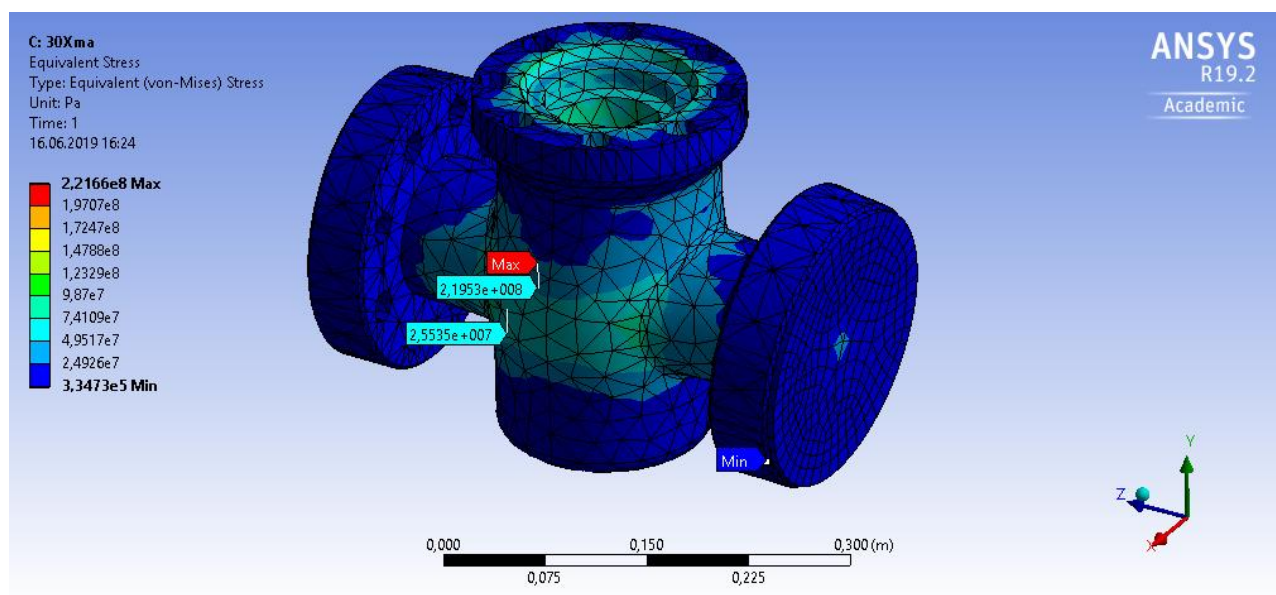
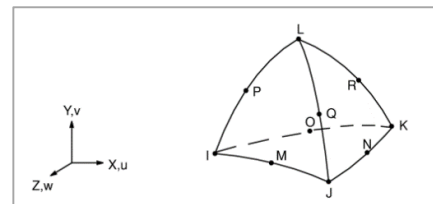


Рисунок 2 – Анализ НДС задвижки ЗМС-50x35.01PP

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		22

Как уже отмечалось, согласно отечественным нормам для оценки прочности арматуры необходимо разделение напряжений по категориям и сравнение полученных значений с допускаемыми. Однако такой подход имеет ряд недостатков. Как правило большинство деталей арматуры (и в особенности корпус) являются литыми изделиями со сложной геометрией и многочисленными фасонными поверхностями, поэтому при построении геометрических моделей используют объемные элементы. В этом случае для категоризации напряжений необходимо применять линейризацию, используя линии приведения.

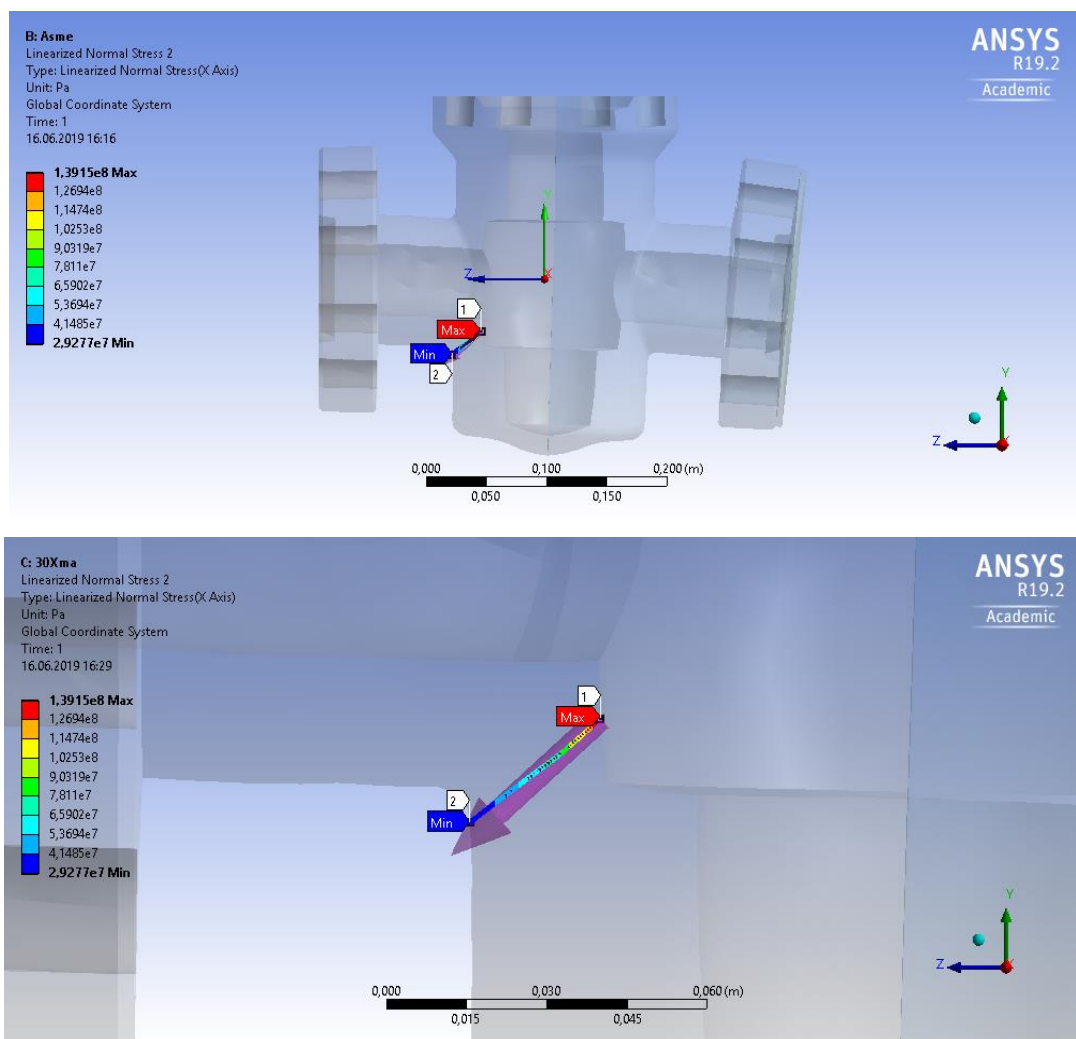


Рисунок 3 – Линейризация напряжений

Линейризация позволяет разделить напряжения на мембранные, изгибные и пиковые. Результаты линейризации приведены на рисунке 4.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		23

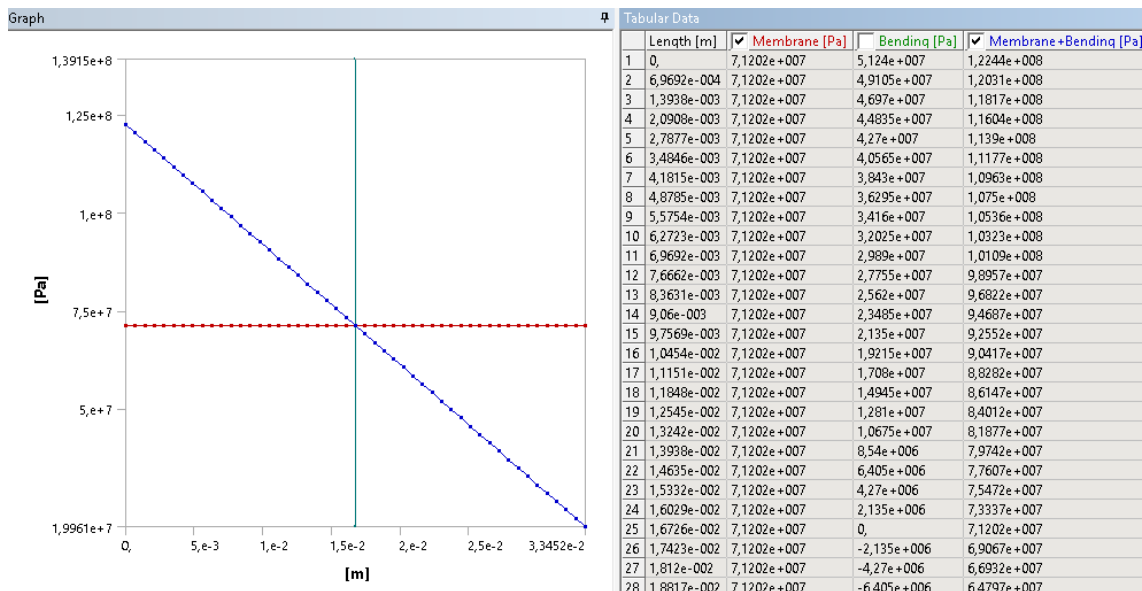


Рисунок 4 – Разделение напряжений на мембранные и изгибные

В результате приведенные напряжения, определяемые по суммам составляющих местных мембранных и общих изгибных напряжений равны  $(\sigma)_2 = 122,4$  МПа .

Кроме мембранных и изгибных напряжений, Нормы ПНАЭ-Г-7-002-86 ограничивают размах приведенных напряжений (расчет на циклическое нагружение делается отдельно, здесь ограничения на размах связаны только с тем, что наклон диаграммы деформирования должен быть не слишком большим). Если считать, что размах определяется двумя состояниями (номинальное рабочее давление и давление, равное 0), то величина размаха равна величине максимального напряжения (рис. 2):

$$(\sigma)_{RV} = 221,6 \text{ МПа} .$$

Допускаемые напряжения:

$$(\sigma)_2 \leq 1,3 \cdot [\sigma] = 1,3 \cdot 215 = 279,5 \text{ МПа}$$

$$(\sigma)_{RV} = 221,6 \text{ МПа} \leq \left( 2,5 - \frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T} \right) \cdot R_{p0,2}^T = \left( 2,5 - \frac{373}{559} \right) \cdot 373 = 683,6 \text{ МПа}$$

Условия прочности выполняются. Условия прочности будут выполняться вплоть до давления

$$P = \min \left\{ P_{\text{раб}} \cdot \frac{(\sigma)_2 \text{ доп}}{(\sigma)_2}, P_{\text{раб}} \cdot \frac{(\sigma)_{RV} \text{ доп}}{(\sigma)_{RV}} \right\} = \min \{80, 108\} = 80 \text{ МПа}$$



## 2.3 Изучение методов расчета элементов оборудования, находящихся под давлением, в стандартах ASME BPVC-2015

Согласно нормам ASME [2], VIII, раздел 1 UG-22 в процессе проектирования должны быть учтены следующие нагрузки:

- 1) внутреннее или внешнее расчетное давление;
- 2) каждый элемент сосуда давления должен рассчитываться так, чтобы выдерживать, как минимум, самый тяжелый режим совпадения давления и температуры, ожидаемый при нормальной эксплуатации. Для такого режима и для режимов испытаний нужно учитывать максимальную разность давлений между внутренней и внешней сторонами сосуда или между двумя любыми камерами комбинированной установки;
- 3) вес сосуда и нормальное заполнение в условиях эксплуатации или испытаний (при этом учитывается дополнительное давление под действием статического напора жидкости);
- 4) наложенные статические реакции под действием веса прикрепленного оборудования, такого как моторы, механизмы, другие сосуды, трубы, облицовка и изоляция;
- 5) нагрузки от крепления;
- 6) циклические и динамические реакции под действием колебания давления или температуры, а также под действием оборудования, установленного на сосуде, и механических нагрузок;
- 7) ветровую, снеговую и сейсмическую реакции, если они имеют место;
- 8) реакции на удар, например, в связи с гидравлическими ударами;
- 9) температурные градиенты и различное тепловое расширение;
- 10) отклоняющееся от нормы давление, например, вызванное выбросами пламени.

Нагрузки и случаи нагружений, которые следует учитывать при аналитическом проектировании приведены в таблице 8.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						25
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Таблица 8 – Нагрузки и случаи нагружения при различных режимах работы

Условие нагружения	Проектные нагрузки
Испытание давления	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Собственный вес изделия плюс изоляция, противопожарная защита, и другое оборудование, для которого данная конструкция служит опорой в установленном состоянии.</li> <li>2. Нагрузки от трубопроводов, включая реактивную силу давления.</li> <li>3. Прилагаемые временные нагрузки, за исключением вибрации и временных нагрузок при обслуживании.</li> <li>4. Нагрузки от давления и жидкости (воды) для испытаний, промывки оборудования и перекачивания, если не задано пневматическое испытание.</li> <li>5. Ветровые нагрузки.</li> </ol>
Нормальная работа	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Собственный вес изделия плюс изоляция, огнеупор, противопожарная защита, и другое оборудование, для которого данная конструкция служит опорой в установленном состоянии.</li> <li>2. Нагрузки от трубопроводов, включая реактивную силу давления.</li> <li>3. Прилагаемые временные нагрузки.</li> <li>4. Нагрузка от давления и жидкости в процессе нормальной работы.</li> <li>5. Термические нагрузки.</li> </ol>
Нормальная работа плюс аномалии (обычно обусловлены ветром или землетрясением; однако, могут иметь место и другие типы нагрузок, такие как снег и лед).	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Собственный вес изделия плюс изоляция, огнеупор, противопожарная защита, установленные внутрикорпусные устройства и другое оборудование, для которого данная конструкция служит опорой в установленном состоянии.</li> <li>2. Нагрузки от трубопроводов, включая реактивную силу давления.</li> <li>3. Прилагаемые временные нагрузки.</li> <li>4. Нагрузка от давления и жидкости в процессе нормальной работы.</li> <li>5. Термические нагрузки.</li> <li>6. Ветер, землетрясение или другие случайные нагрузки, по наибольшей.</li> <li>7. Нагрузки, обусловленные волновым перемешиванием.</li> </ol>
Аномальная работа или запуск плюс случайные явления	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Собственный вес изделия плюс изоляция, огнеупор, противопожарная защита, установленные внутрикорпусные устройства и другое оборудование, для которого данная конструкция служит опорой в установленном состоянии.</li> <li>2. Нагрузки от трубопроводов, включая реактивную силу давления.</li> <li>3. Прилагаемые временные нагрузки.</li> <li>4. Нагрузка от давления и жидкости в процессе нормальной работы.</li> <li>5. Термические нагрузки.</li> <li>6. Ветровые нагрузки.</li> </ol>

При анализе напряжений необходимо определить следующие свойства материала:

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						26
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

1) Физические свойства: модуль Юнга, коэффициент теплового расширения, теплопроводность, температуропроводность, плотность, коэффициент Пуассона.

2) Прочностные параметры: допускаемое напряжение, минимально установленный предел текучести, минимально установленный предел прочности на разрыв

3) Монотонная кривая зависимости деформаций от напряжений с деформационным упрочнением.

4) Циклическая кривая зависимости деформаций от напряжений – стабилизированная истинная амплитудная характеристика зависимости деформаций от напряжений (циклическая кривая).

#### Защита от пластического разрушения

Для оценки защиты от пластического разрушения предусмотрены три альтернативных метода анализа:

1) *Метод анализа упругих напряжений* – Напряжения вычисляются с применением анализа упругости, классифицируются по категориям и ограничиваются допускаемыми значениями, которые обычно устанавливаются таким образом, чтобы исключить пластическое разрушение.

2) *Метод предельных нагрузок* – Расчет выполняется для определения нижней границы предельной нагрузки компонента. Допускаемая нагрузка на компонент устанавливается путем применения к предельной нагрузке расчетных коэффициентов, таким образом, чтобы не возникли большие пластические деформации (пластическое разрушение).

3) *Метод анализа напряжения, соответствующего упругопластической деформации* – Разрушающая нагрузка выводится из упругопластического анализа, с учетом прикладываемой нагрузки и характеристик деформации компонента. Допускаемая нагрузка на компонент устанавливается путем применения расчетных коэффициентов к нагрузке пластического разрушения.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						27
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

### 2.3.1 Метод анализа упругих напряжений

Идея метода – использование упругих решений и приближенный учет пластического деформирования путем использования категорий напряжений и коэффициентов запаса прочности для разных категорий (по аналогии с ПНАЭ Г-7-002-86).

Чтобы оценить защиту от пластического разрушения, результаты анализа упругого напряжения компонента, подвергаемого определенным условиям нагрузки, необходимо разделить по категориям и сравнить со связанным предельным значением. При этом, величина  $S_e$ , известная как эквивалентное напряжение, вычисляется в определенных зонах компонента и сравнивается с допускаемым значением эквивалентного напряжения, для определения того, соответствует ли изделие заданным проектным условиям. Эквивалентное напряжение в точке компонента является мерой напряжения, которая вычисляется из компонентов напряжения с использованием критерия текучести, и используется для сравнения с механическими прочностными свойствами материала, полученными из испытаний при одноосной нагрузке.

Проектные нагрузки, которые необходимо оценить, и комбинации случаев нагружения приведены в таблице 9.

При выполнении анализа должны приниматься во внимание комбинации нагрузок. Комбинации нагрузок для анализа упругих напряжений представлены в таблице 10.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						28
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Таблица 9 – Описание нагрузки

Проектный параметр нагрузки	Описание
P	Внутреннее и наружное максимально допустимое рабочее давление.
$P_s$	Статический столб жидкости или насыпной материал (например, катализатор)
D	Собственный вес сосуда, содержимое и принадлежности в соответствующих местах, включая следующее: <ul style="list-style-type: none"> <li>- вес сосуда, включая установленные внутрикорпусные устройства, укрепления (напр. юбки, выступы, седла, опоры) и принадлежности (напр. платформы, лестницы и пр.);</li> <li>- вес содержимого сосуда в работе и в условиях испытания;</li> <li>- огнеупорная футеровка, изоляция;</li> <li>- статические реакции от веса присоединенного оборудования, такого как двигатели, механизмы, другие сосуды и трубопроводы.</li> </ul>
L	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Нагружение от временных принадлежностей.</li> <li>- Влияния движения жидкости, установившийся режим и переходные режимы.</li> </ul>
E	Нагрузки от землетрясения
W	Ветровые нагрузки
$W_{pt}$	Случай ветровой нагрузки при испытании давления. Проектная скорость ветра для данного случая должна быть указана Владельцем – Пользователем.
$s_s$	Нагрузки от снега
T	Случай самоограничения нагрузки (то есть термические нагрузки, приложенные перемещения). Этот случай нагружения, в сущности, не оказывает влияния на разрушающую нагрузку, но должен учитываться в случаях, когда последствие упругого воздействия вызывает напряжения, которые не снимаются в достаточной мере для перераспределения нагрузки без чрезмерной деформации.

Составляющими проектного параметра нагрузки D являются момент и сила со стороны присоединенных трубопроводов:  $M = 951 \text{ Нм}$ ,  $F = 68720 \text{ Н}$ .

Рабочее давление принято равным  $P = 35 \text{ МПа}$ .

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						29
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Таблица 10 – Комбинации случаев нагружения и допустимые мембранные напряжения для упругого анализа

Проектная комбинация нагружения	Допустимое главное начальное мембранное напряжение (1), (2), (3)
$P + P_s + D$	S
$P + P_s + D + L$	S
$P + P_s + D + S$	S
$0,6D + (W \text{ или } 0,7E)$ (4)	S
$0,9P + P_s + D + (W \text{ или } 0,7E)$	S
$0,9P + P_s + D + 0,75L + 0,15S$	S
$0,9P + P_s + D + 0,75(W \text{ или } 0,7E) + 0,75L + 0,15S$	S

Примечания:

- 1) Параметры, используемые в колонке Проектная комбинация нагружения, определены в Таблице 5.2.
- 2) Под выражением 0.9P подразумевается рабочее давление.
- 3) S – допустимое напряжение для комбинации случаев нагружений. Эта величина представляет собой предел основного начального мембранного напряжения для нагружено-контролируемых нагрузок.
- 4) Эта нагрузочная комбинация относится к условию опрокидывания. Если в проект включено анкерное крепление, рассмотрение этой нагрузочной комбинации отпадает.

Для анализа нагруженности компонента был выбран материал сталь G41350 (аналог стали 30ХМА) и определены его физические свойства и прочностные параметры:

Значения предела текучести ( $S_y$ ) в зависимости от температуры приведены в Таблице Y-1 «Свода правил ASME B&PV», Секция II, Часть D. Значения предела прочности на разрыв в зависимости от температуры приведены в Таблице U «Свода правил ASME B&PV», Секция II, Часть D.

$$S_u = 825 \text{ МПа} \quad S_y = 485 \text{ МПа}$$

Основное допускаемое напр. по ASME BPVC определяется пределом прочности и запасом по нему.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						30
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

$$S_m = \min \left\{ \frac{2}{3} S_y; \frac{1}{2} S_u \right\} = \min \left\{ \frac{2}{3} \cdot 485; \frac{1}{2} \cdot 825 \right\} = 323,3 \text{ МПа} \quad (2)$$

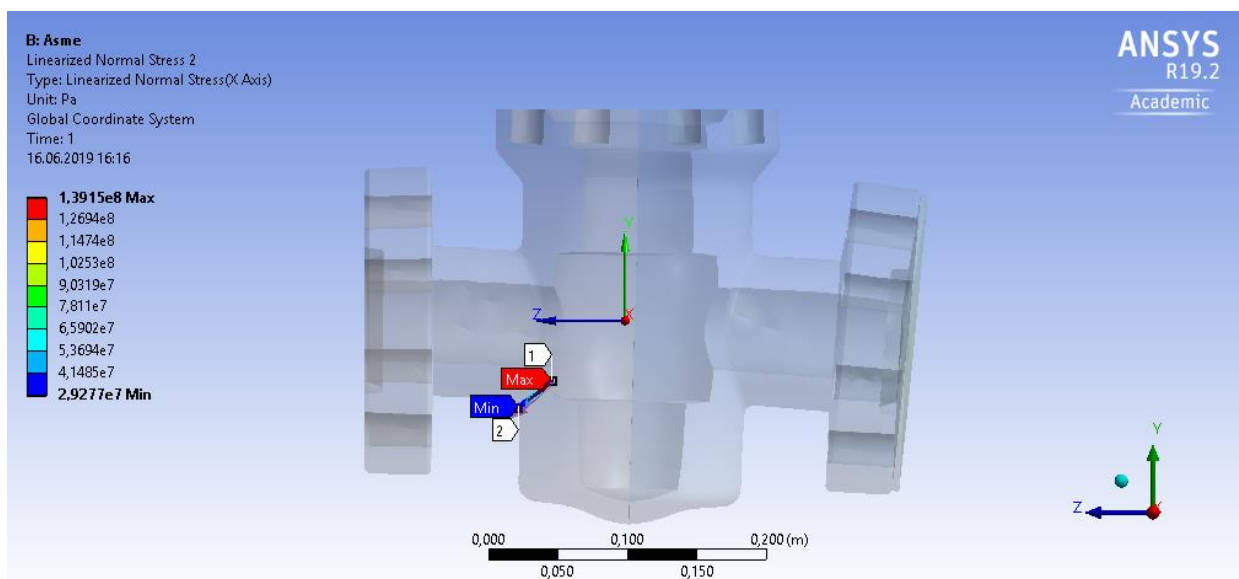
Далее определяются три основные категории эквивалентных напряжений, которые должны быть удовлетворены для пластического разрушения.

1) Общее первичное мембранное эквивалентное напряжение  $P_m$  – это эквивалентное напряжение, получаемое из средней величины по толщине сечения из общих начальных напряжений, обусловленных проектным внутренним давлением и другими заданными механическими нагрузками, но за исключением всех дополнительных и пиковых напряжений.

2) Местное первичное мембранное эквивалентное напряжение  $P_L$  – это эквивалентное напряжение, получаемое из средней величины по толщине сечения из местных первичных напряжений, обусловленных проектным давлением и заданными механическими нагрузками, но за исключением всех дополнительных и пиковых напряжений.

3) Первичное мембранное (общее или местное) плюс первичное изгибное эквивалентное напряжение  $P_L + P_b$  – это эквивалентное напряжение, получаемое из самой высокой величины по толщине сечения из общих линейризованных или местных мембранных начальных напряжений плюс первичные изгибные напряжения, обусловленные проектным давлением и другими заданными механическими нагрузками, но за исключением всех дополнительных и пиковых напряжений.

Для категоризации напряжений необходимо применить линейризацию, используя линии приведения.



					Лист
					31
Изм.	Лист	№ Документа	Подпись	Дата	<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>

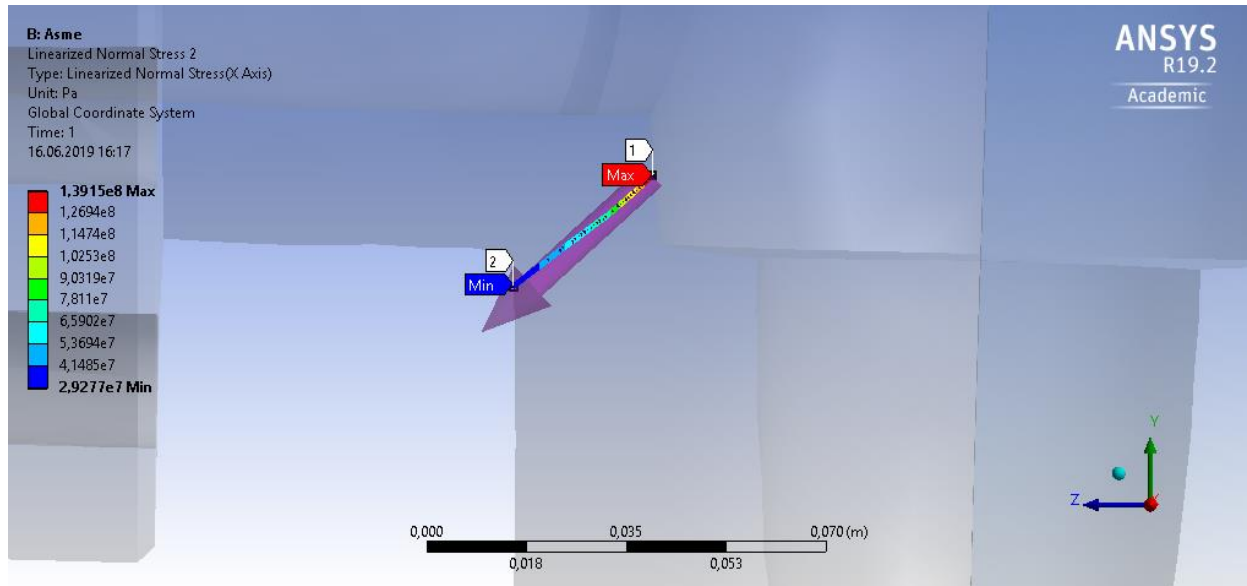


Рисунок 5 – Линеаризация напряжений

Линеаризация позволяет разделить напряжения на мембранные, изгибные и пиковые. Результаты линеаризации приведены на рисунке 6.

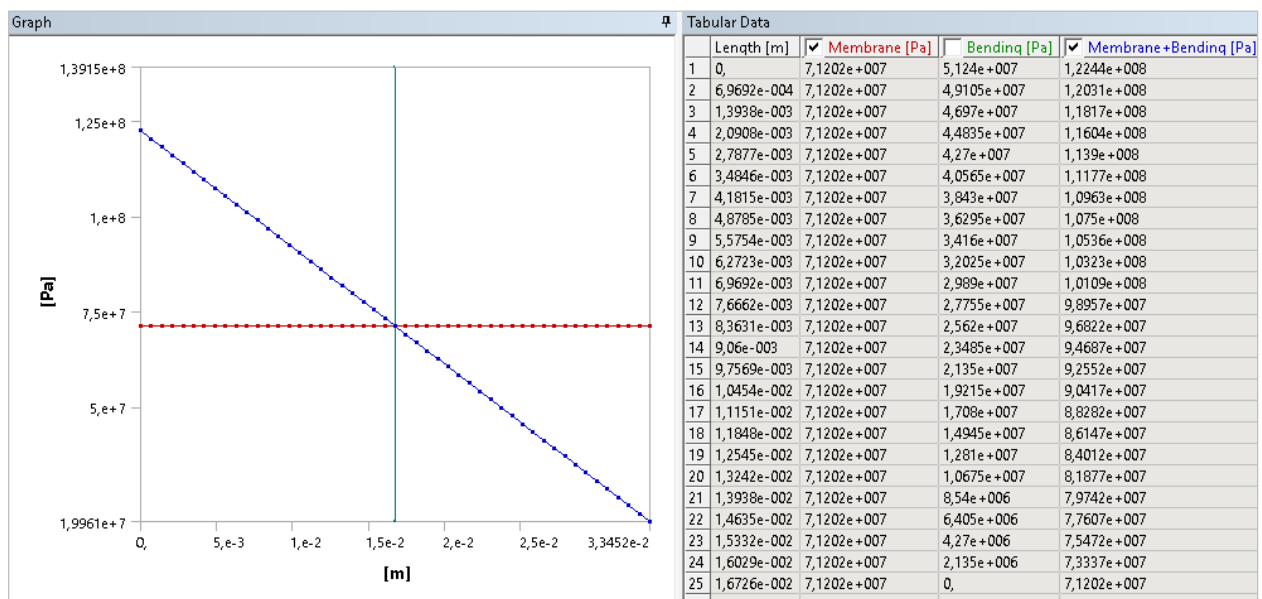


Рисунок 6 – Разделение напряжений на мембранные и изгибные

$$P_L = 71,2 \text{ МПа}$$

$$P_b = 51,2 \text{ МПа}$$

$$S_e = 122,4 \text{ МПа}$$



Результаты анализа упругих напряжений могут быть использованы для вычисления эквивалентных линейризованных мембранных и изгибных напряжений для их сравнения с заданными пределами.

Так как в задаче анализируется случай нагружения, включающий только регулируемые нагрузки (давление и влияние веса), то вычисленные эквивалентные напряжения должны быть использованы для прямого представления  $P_L + P_b$ .

Для оценки защиты от пластического разрушения, сравниваются вычисленные эквивалентные напряжения с соответствующими допустимыми значениями:

$$P_L < S_m = 323,3 \text{ МПа}$$

$$(P_L + P_b) \leq 1,5S = 485 \text{ МПа}$$

Условия прочности выполняются.

Тогда, допускаемое рабочее давление:

$$P = P_{\text{раб}} \cdot \frac{(P_L + P_b)_{\text{доп}}}{(P_L + P_b)} = 35 \cdot \frac{485}{122,4} = 138 \text{ МПа}$$

### 2.3.2 Метод анализа напряжения, соответствующего упругопластической деформации

Защита от пластического разрушения оценивается путем определения нагрузки пластического разрушения компонента с использованием анализа напряжения, соответствующего упругопластической деформации. Допускаемая нагрузка на компонент устанавливается путем применения к рассчитанной нагрузке пластического разрушения расчетного коэффициента.

Нагрузка пластического разрушения может быть получена с использованием техники численного анализа, например, методом конечных элементов.

Пригодность компонента с использованием упругопластического анализа определяется при удовлетворении следующих критериев:

1) Глобальный критерий – глобальная нагрузка пластического разрушения определяется путем выполнения упругопластического анализа компонента,

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						33
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

подвергаемого заданным условиям нагружения. За нагрузку пластического разрушения принимается нагрузка, вызывающая полную структурную нестабильность.

2) Эксплуатационный критерий – эксплуатационный критерий, ограничивающий потенциал неудовлетворительной работы, должен быть выдержан в любой зоне компонента, где предполагается приложение проектных нагрузок.

Комбинации случаев нагружения и нагрузочные коэффициенты для упруго-пластического анализа представлены в табл. 11

Таблица 11 – Комбинации случаев нагружения и нагрузочные коэффициенты для анализа эластичности-пластичности

Проектные условия	
Критерий	Требуемые факторизованные комбинации нагрузок
Глобальный критерий	1) $2,4 \cdot (P + P_s + D)$ 2) $2,1 \cdot (P + P_s + D + T) + 2,6L + 0,86S_s$ 3) $2,1 \cdot (P + P_s + D) + 2,6S_s + \max[1,7L, 1,4W]$ 4) $2,4 \cdot (P + P_s + D) + 2,6W + 1,7L + 0,86S_s$ 5) $2,4 \cdot (P + P_s + D) + 2,6W + 1,7E + 1,7L + 0,34S_s$
Локальный критерий	$1,7 \cdot (P + P_s + D)$
Гидростатические условия испытания	
Глобальный и локальный критерий	$\max \left[ 2,3, 2,0 \left( \frac{S_T}{S} \right) \right] \cdot (P + P_s + D) + W_{pt}$
Пневматические условия испытания	
Глобальный и локальный критерий	$1,8 \cdot \left( \frac{S_T}{S} \right) (P + P_s + D) + W_{pt}$

Для проектных расчетов используется модель кривой растягивающих напряжений, построенная по следующим зависимостям.

$$\varepsilon_{ts} = \frac{\sigma}{E} + \gamma_1 + \gamma_2 \quad (3)$$

$$\gamma_1 = \frac{\varepsilon_1}{2} (1,0 - \tanh(H)) \quad (4)$$

$$\gamma_2 = \frac{\varepsilon_2}{2} (1,0 - \tanh(H)) \quad (5)$$

$$\varepsilon_1 = \left( \frac{\sigma}{A_1} \right)^{\frac{1}{m_1}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_2 = \left( \frac{\sigma}{A_2} \right)^{\frac{1}{m_2}} \quad (7)$$

$$A_1 = \frac{S_y (1 + \varepsilon_{ys})}{(\ln(1 + \varepsilon_{ys}))^{m_1}} \quad (8)$$

$$m_1 = \frac{\ln(R) + (\varepsilon_p - \varepsilon_{ys})}{\ln \left[ \frac{\ln(1 + \varepsilon_p)}{\ln(1 + \varepsilon_{ys})} \right]} \quad (9)$$

$$A_2 = \frac{S_u \exp(m_2)}{m_2^{m_2}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{ys} = 0,002 \quad (11)$$

$$m_2 = 0,6(1,00 - R) \quad (12)$$

$$\varepsilon_p = 2,0E - 5 \quad (13)$$

$$H = \frac{2[\sigma - (S_y + K(S_u - S_y))]}{K(S_u - S_y)} \quad (14)$$

$$K = 1,5R^{1,5} - 0,5R^{2,5} - R^{3,5} \quad (15)$$

$$R = \frac{S_y}{S_u} \quad (16)$$

где  $\sigma$  – фактическое напряжение, при котором оценивается реальная деформация; может быть мембранным, мембранным плюс изгибающим в зависимости от применения;

$\gamma_1$  – фактическая деформация в области микродеформаций на кривой растягивающих напряжений;

$\gamma_2$  – фактическая деформация в области макродеформаций на кривой растягивающих напряжений;

$\varepsilon_1$  – фактическая пластическая деформация в области микродеформаций на кривой растягивающих напряжений;

$\varepsilon_2$  – фактическая пластическая деформация в области макродеформаций на кривой растягивающих напряжений;

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						35
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

$H$  – параметр кривой растягивающих напряжений.

$A_1$  – постоянная для области упругих деформаций кривой растягивающих напряжений;

$A_2$  – постоянная для области пластических деформаций кривой растягивающих напряжений;

$m_1$  – экспонента для кривой растягивающих напряжений, равная фактической деформации при пределе упругой деформации;

$m_2$  – экспонента для кривой растягивающих напряжений, равная фактической деформации при предельном напряжении;

$\epsilon_{ys}$  – 0,2 % техническое смещенное напряжение;

$\epsilon_p$  – параметр кривой растягивающих напряжений

$R$  – отношение расчетного напряжения текучести к расчетному напряжению при растяжении;

По зависимостям 3–16 кривая растягивающих напряжений была построена в пакете Mathcad (рис.7), а затем интегрирована в пакет Ansys.

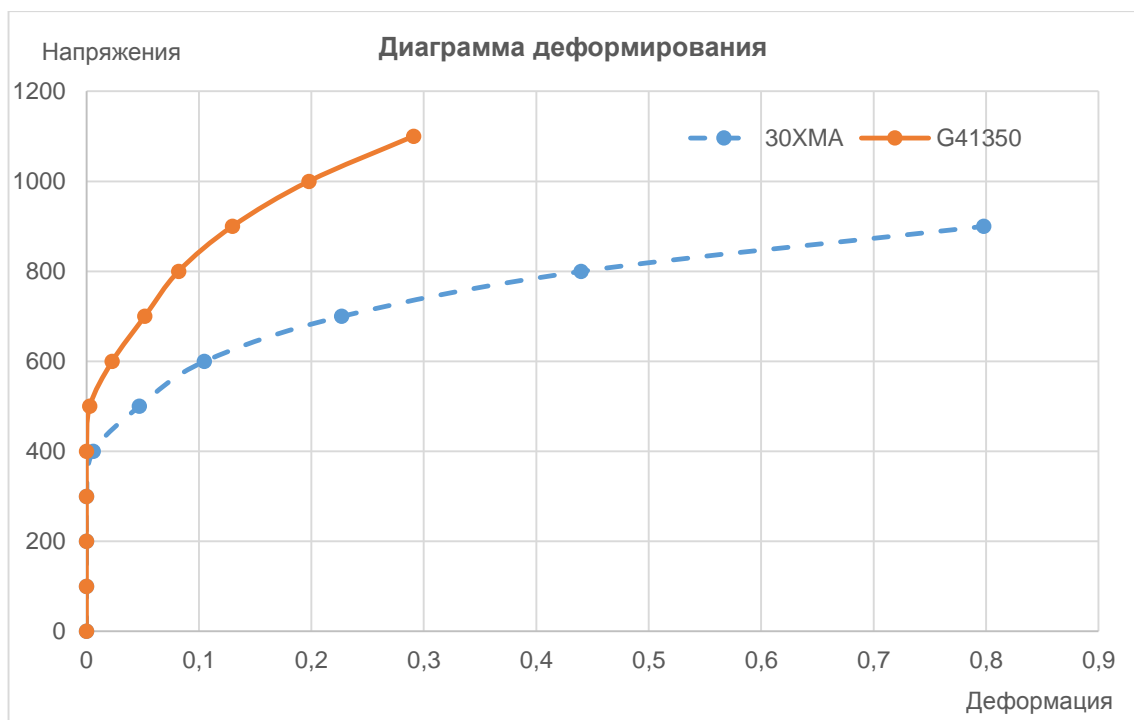


Рисунок 7 – Кривая растягивающих напряжений

Нагрузочная траектория делилась на  $k$  нагрузочных приращений, в каждом из которых давление увеличивалось и для каждого нагрузочного приращения выполнялся расчет задвижки до тех пор, пока наблюдалась сходимость решения.

Давление, при котором сходимость решения прекращается, является критическим ( $P^*$ ).

Результаты вычислений показаны на рис.8.

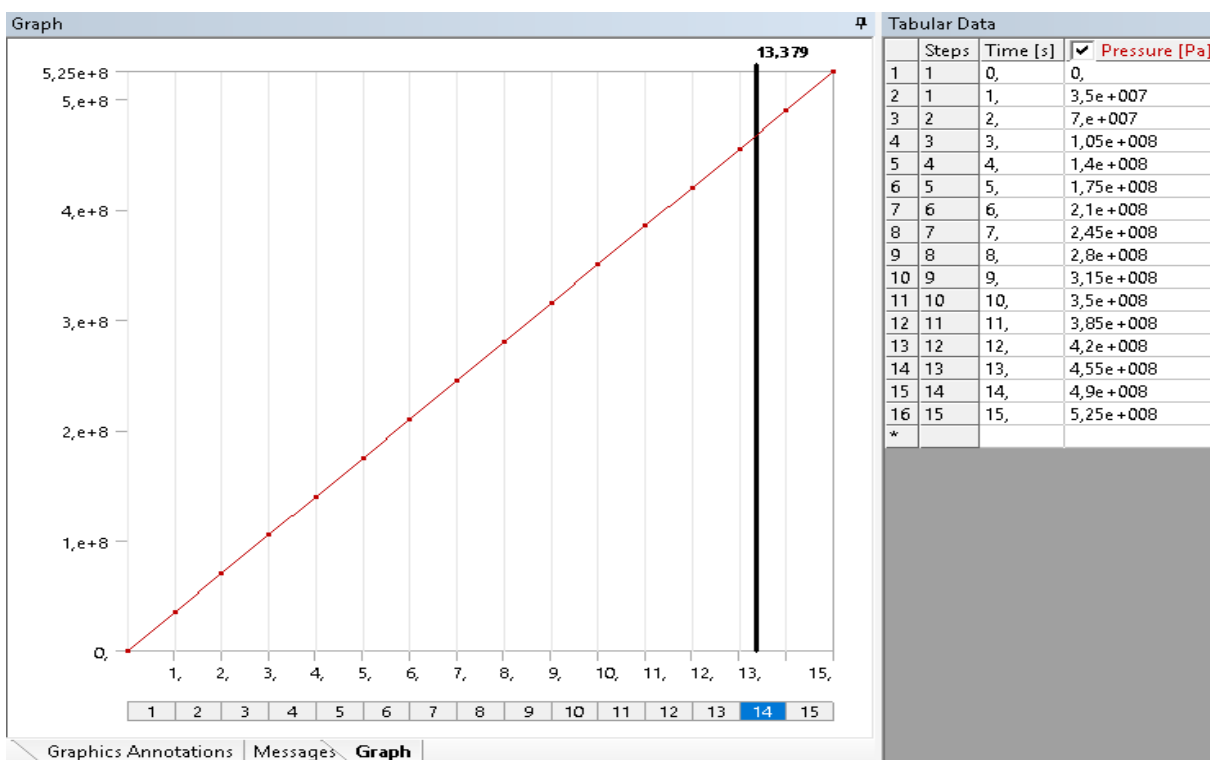
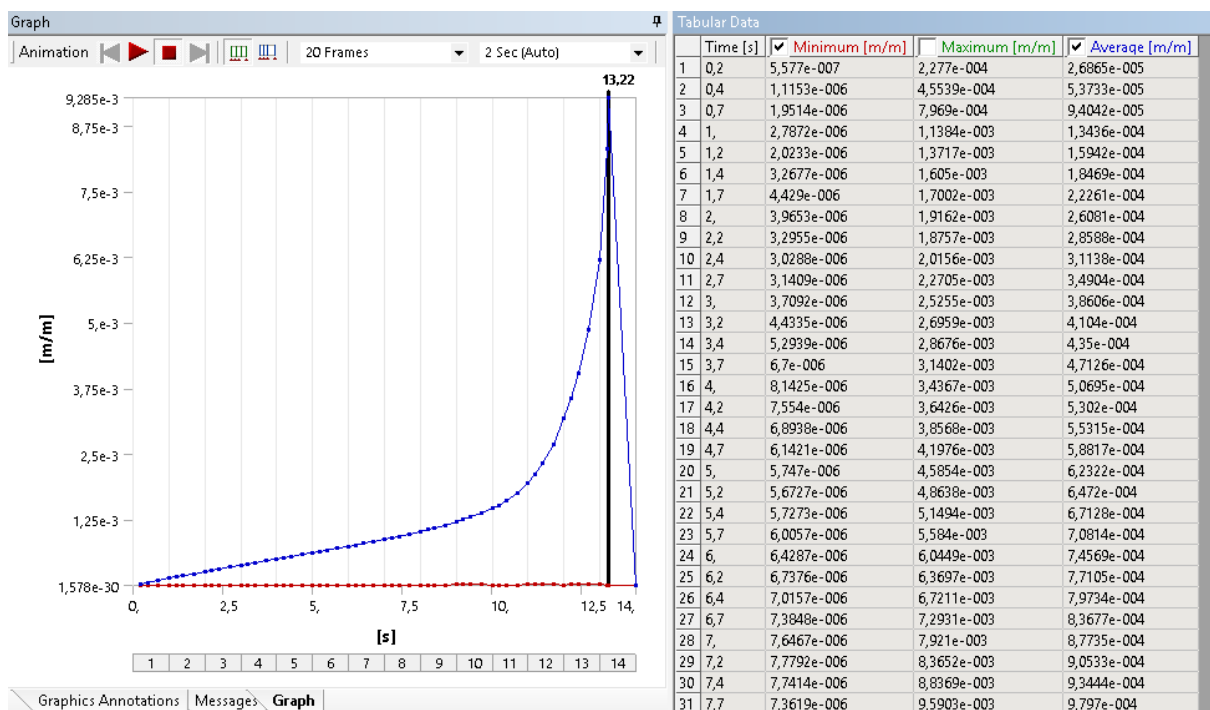


Рисунок 8 – Расчет величины критического давления для стали G41350

Для стали G41350 величина критического давления достигла значения

$P_* = 460$  Мпа

## Допускаемое рабочее давление

$$P_{\text{раб}} \leq \frac{P_*}{2,4} = 191 \text{ Мпа}$$

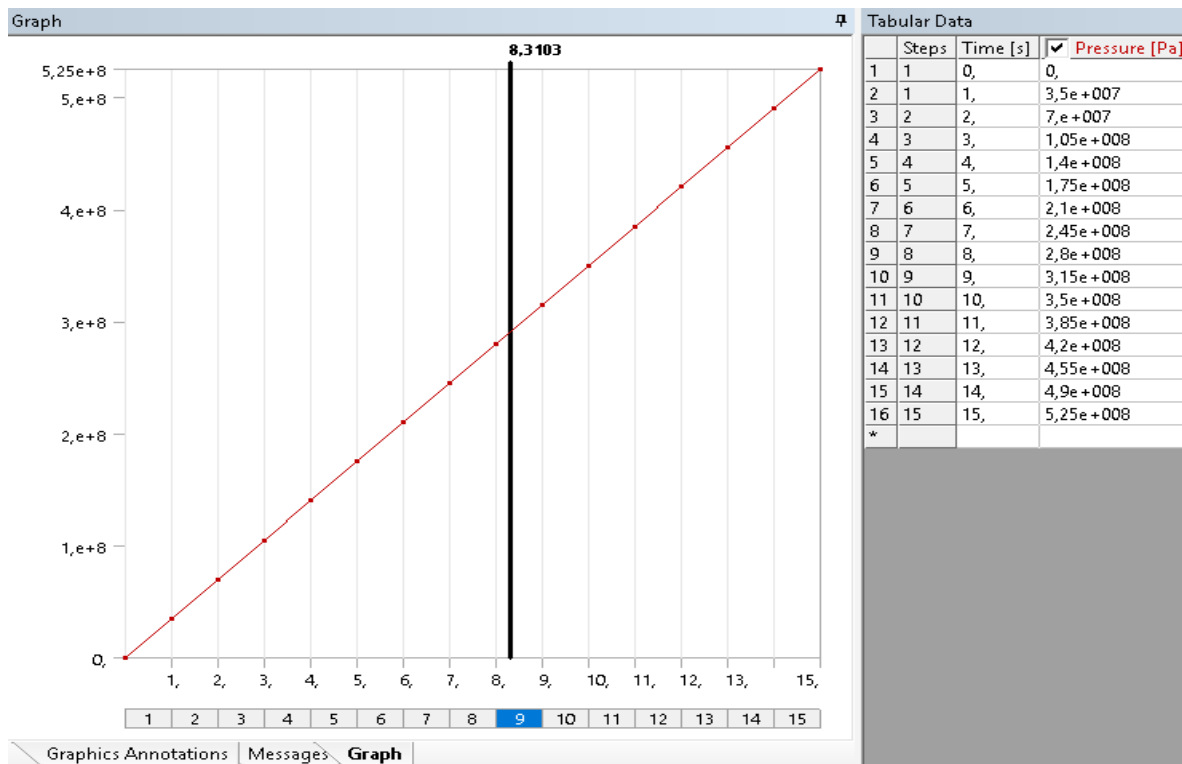
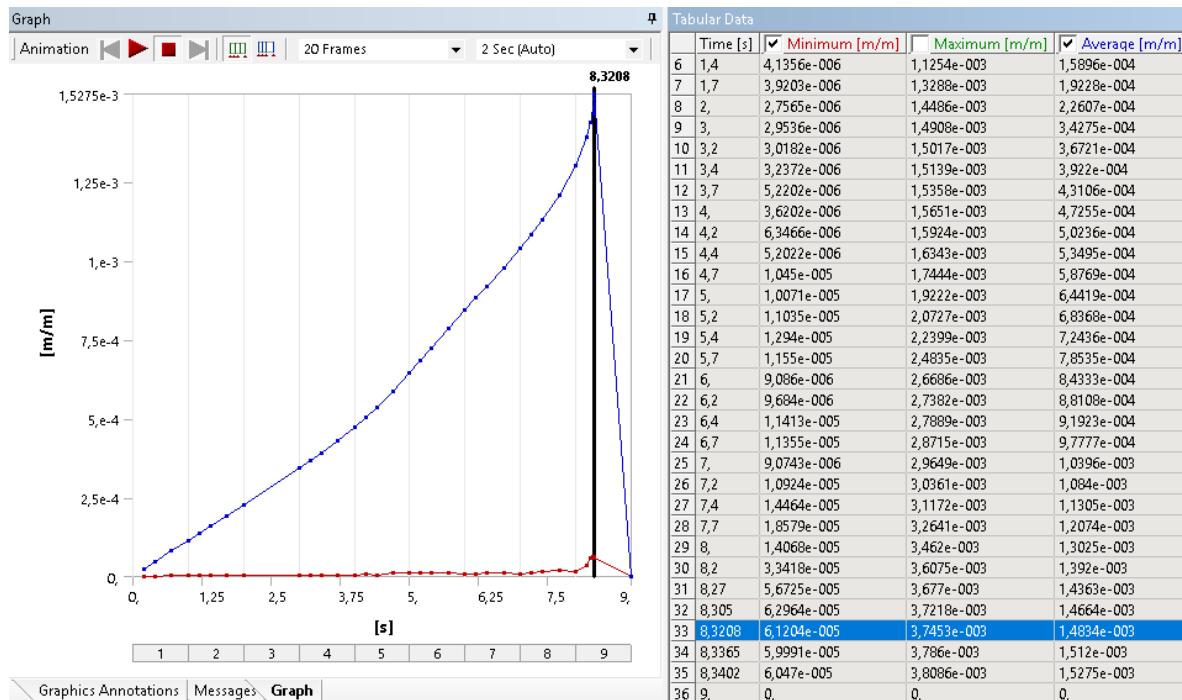


Рисунок 9 – Расчет величины критического давления для стали 30ХМА

Для стали 30ХМА величина критического давления достигла значения

$$P_* = 300 \text{ Мпа}$$

Допускаемое рабочее давление

$$P_{\text{раб}} \leq \frac{P^*}{2,4} = 125 \text{ МПа} .$$

### Выводы

Сравнительная характеристика расчетных значений приведена в табл.12

Таблица 12 – Значения допускаемого напряжения и рабочего давления, рассчитанных по нормам ПНАЭ-Г-7-002-86 и ASME BPVC

	Метод 1			Метод 2		
	ПНАЭ (30ХМА)	ASME BPVC		ПНАЭ	ASME BPVC	
		30ХМА	G41350		30ХМА	G41350
Допускаемое напряжение, МПа	$1,3[\sigma] = 279,5$	373	$1,5S_m = 485$	–	–	
Допускаемое рабочее давление, МПа	80	107	138	–	125	191

Анализ напряжения, соответствующего упругопластической деформации, дает более точную оценку защиты от пластического разрушения компонента по сравнению с критериями метода анализа напряжений, так как действительное структурное поведение аппроксимировано в этом случае более близко.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						39
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

## Заключение

Выполненное сравнение расчетов на статическую прочность одной и той же конструкции при одних и тех же нагрузках с использованием отечественных и американских Норм прочности показало:

1) Рассмотренный элемент конструкции – корпус проектируемой задвижки ЗМС-50х35.01РР для фонтанной арматуры скважин – удовлетворяет условиям статической прочности как по российским, так и по американским Нормам.

2) Нагрузка на корпус может быть увеличена при сохранении требования выполнений условий прочности. Это увеличение различно по разным Нормам и даже разным методам расчета, допускаемым одними (американскими) нормами.

Наименьшее увеличение допускают российские Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, использующие условные упругие решения и категоризацию напряжений. Увеличение, которое допускает ASME Boiler and Pressure Vessel Code при использовании того же метода расчета, несколько выше – за счет меньшего нормативного запаса по пределу прочности (запас по пределу текучести одинаков). Соответствующее различие составляет около 25%.

ASME BPVC разрешают и применение более современного метода расчета – численного анализа за пределами упругости (со своими коэффициентами запаса). Допускаемая нагрузка, рассчитанная этим методом, оказывается на 20% выше нагрузки, рассчитанной с использованием упругого расчета и категорий напряжений, и на 50% выше нагрузки, рассчитанной по ПНАЭ Г-7-002-86.

3) Механические характеристики материалов, аналогичных по химическому составу, в ASME BPVC и российских нормах отличаются. Это отличие различно для разных марок и составляет от 4% до 50%. Причину этого различия невозможно выяснить без детального анализа технологии производства и стабильности свойств.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						40
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		



## Список литературы

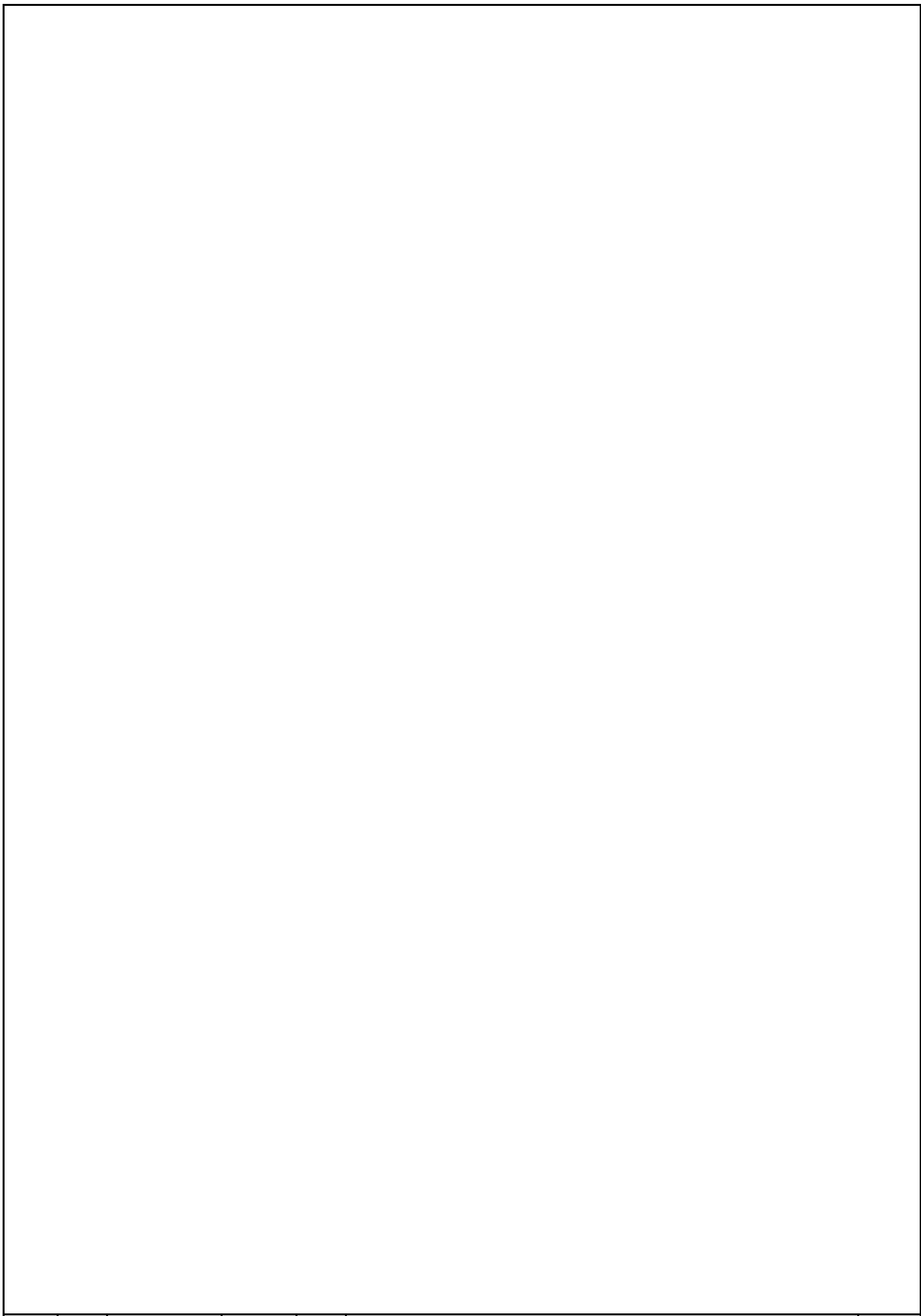
1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86.
2. Нормы на котлы и сосуды высокого давления, ASME секция VIII, раздел 3 (Американское общество инженеров-механиков).
3. Нормы на котлы и сосуды высокого давления, ASME секция VIII, раздел 2 (Американское общество инженеров-механиков).
4. ANSI/API Specification 6A. Спецификация на устьевое и фонтанное оборудование. Американский институт нефти.
5. ГОСТ 52857.2-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. М.: Стандартинформ, 2008.
6. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. /Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко – М.: 2014. 1216 с.: илл.
7. НП-068-05 Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования. / ГУП НИЦ ВНИИАЭС при участии Мусвика А.Б.,Малинина Ю.И. и др., М., 2005.
8. Ю.Е.Гузенко, Н.М.Куцев Анализ конструкций трубопроводов с использованием программного обеспечения Ansys. //Cadm Review, №4/2017, с.44-46.
9. А.В. Белобородов. Оценка надежности трубопроводной арматуры. //Ansys, №2/2006.
10. A. Aynbinder, B. Green, B. Taska, P. Dalton, Stress Criteria of American Oil and Gas Pipeline Design Code and Comparisons with Russian SNIP 2.05.06-85, Gulf interstate Engineering. Houston, USA, 1994.
11. Строительные нормы и правила. СНиП 2.04.12\_86. Расчет на прочность стальных трубопроводов. М., 2006.

					<i>ЮУрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						41
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

12. Назаров М.В., Королев И.К. Расчет НДС и оценка сопротивления хрупкому разрушению корпуса арматуры. //Ansys №16/2011, с.13-16.

13. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды, РД 10-249-98. М., 2010.

					<i>ЮЧрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						<i>42</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		



					<i>ЮЧрГУ-150303.19.036.00.ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						<i>5</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		