



УДК 621.643.412

Б. Б. ЛАМПСИ, канд. техн. наук, доц., зав кафедрой теории сооружений и технической механики; Б. Б. ЛАМПСИ, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры теории сооружений и технической механики

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ ВОДОПОДЪЕМНОЙ КОЛОННЫ ПО
ПРОЕКТУ «НАДЗЕМНАЯ ЧАСТЬ ПОДЗЕМНОГО ВОДОЗАБОРА
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОДОЙ
ТРУБОПРОКАТНОГО ЦЕХА АО «ВЫКСУНСКИЙ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831)430-54-96;
эл. почта: lampsi@yandex.ru, boris-lampsi@yandex.ru

Ключевые слова: фланцевый узел, напряженно-деформированное состояние.

Произведен анализ напряженно-деформированного состояния фланцевого соединения водоподъемной колонны. Выполнен расчет фланцевых узлов в АРМ FEM при различных вариантах загрузки и различной геометрии фланцевой пластины. Выполнено сравнение результатов расчета.

Фланцевое соединение представляет собой систему, которая состоит из совместно работающих пластин фланцев, болтов, сварных швов и соединяемых элементов в непосредственной близости от фланца либо между ними. В данном соединении эксплуатационная нагрузка (внешние растягивающие усилия) передается через предварительно натянутые пакеты «фланец-болт», а сжимающие – через плотное касание фланца.

Основанием для выполнения настоящего исследования явилась представленная АО «ВМЗ» документация следующего содержания:

- исполнительная схема № 1/1 «Монтаж водоподъемного оборудования»;
- технологическая карта на фланец с четырьмя выпилами;
- паспорта качества на материалы водоподъемной колонны;
- весовые характеристики водоподъемной колонны и насосного оборудования, погруженного в скважину с учетом столба воды (по трем скважинам).

Для расчета принята водоподъемная колонна скважины № 1, имеющая максимальный вес с учетом столба воды 1 765,327 кг. Водоподъемная колонна выполнена из стальной трубы 108×4 мм и состоит из отдельных отправочных марок, соединяемых в единую систему с помощью фланцев. Конструкция фланца включает две стальные пластины толщиной 23 мм, приваренные к торцам стыкуемых труб и соединяемых между собой с помощью 8 болтов М16×80. По периметру фланцевых пластин предусмотрены четыре технологических выпила для прокладки кабелей.

Максимально нагруженным по длине колонны является фланец, расположенный в самой верхней части колонны. В этой связи указанная выше

нагрузка и принята для исследования напряженно-деформированного состояния пластин фланца.

Для выполнения расчета была создана твердотельная конечно-элементная модель в системе прочностного анализа APM FEM. В связи с симметрией конструкции фланцевого узла относительно плоскости контакта пластин в расчетной модели рассматривается одна из симметричных частей фланцевого узла с примыкающим к нему участком трубы. Закрепление расчетной модели, исключаящее только линейные смещения, выполнено по контуру контакта болтов с отверстиями пластины фланца. Нагрузка прикладывалась как равномерно-распределенная по площади поперечного сечения трубы. Длина трубы назначена из условия исключения влияния способа приложения нагрузки на напряженное состояние в конструкции соединения пластины фланца с трубой. Расчетная модель, геометрические параметры которой полностью соответствуют конструктивному исполнению пластины фланца и характеристикам трубы колонны, представлена на рис. 1 цв. вклейки.

При создании конечно-элементной модели были учтены фактические характеристики материалов трубы и пластины фланца:

– сталь трубы: 12X18H10T по ГОСТ 9940-81 и ГОСТ 9941-81 с пределом текучести $R_y = 216$ МПа;

– сталь пластины фланца: 12X18H10T по ГОСТ 12820-80 с пределом текучести $R_y = 195$ МПа для скважин № 2 и 3 и $R_y = 285$ МПа для скважины № 1 (по данным из паспорта к поставке фланца).

Прочностной расчет конечно-элементной модели выполнен в трех вариантах:

1) вариант *a* (рис. 3 цв. вклейки) при загрузке заданной нагрузкой, равной весу водоподъемной колонны с учетом столба воды (1 765,327 кг);

2) вариант *b* (рис. 4 цв. вклейки) при загрузке предельной нагрузкой из условия прочности сечения трубы при ее работе на центральное растяжение. При площади поперечного сечения трубы $\Phi 108 \times 4$ $A = 13,07$ см² предельная растягивающая нагрузка составляет: $N = A \times R_y = 13,07 \times 21,6 = 282,3$ кН (2 823 кг).

3) вариант *c* (рис. 5 цв. вклейки) при загрузке заданной нагрузкой, равной весу водоподъемной колонны с учетом столба воды (1 765,327 кг) и с учетом внутреннего давления 14 атмосфер, создаваемого работающим погружным насосом.

Результатами прочностных расчетов конечно-элементной модели являются поля распределения напряжений по пластине фланца и примыкающего участка трубы, представленные на рис. 3–4 цв. вклейки.

На основании проведенных прочностных расчетов конечно-элементной модели фланцевого узла водоподъемной колонны установлено следующее:

1. Для наиболее нагруженного фланца водоподъемной колонны при загрузке эксплуатационной нагрузкой 1 765,327 кг максимальный уровень приведенных напряжений в пластине фланца составляет 19 МПа (1,9 кН/см²) по периметру отверстий под болты, что существенно меньше значения предела текучести материала пластины фланца $R_y = 195$ МПа (19,5 кН/см²).

2. Технологические выточки в пластине фланца при заданном его конструктивном исполнении не оказывают существенного влияния на напряженно-деформируемое состояние пластины фланца и трубы. При этом

**К СТАТЬЕ Б. Б. ЛАМПСИ, Б. Б. ЛАМПСИ
«АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ ВОДОПОДЪЕМНОЙ КОЛОННЫ ПО
ПРОЕКТУ «НАДЗЕМНАЯ ЧАСТЬ ПОДЗЕМНОГО ВОДОЗАБОРА
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОДОЙ
ТРУБОПРОКАТНОГО ЦЕХА
АО «ВЫКСУНСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**

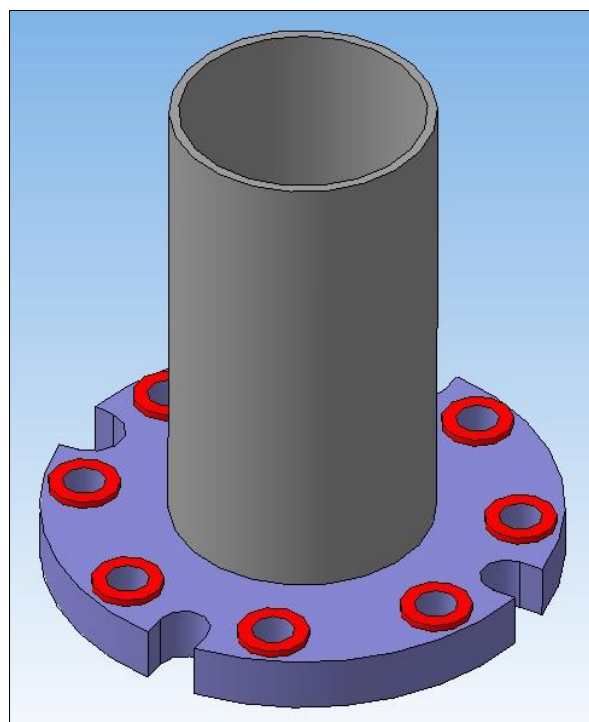
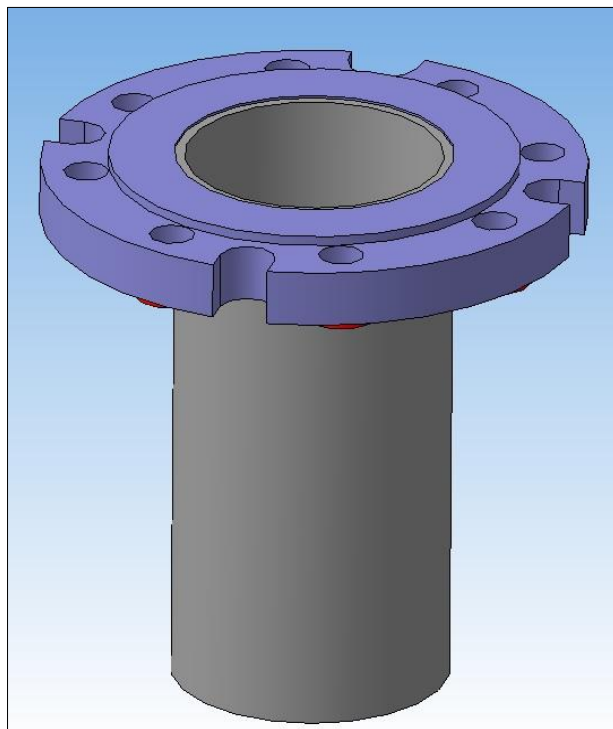


Рис. 1. Расчетная модель фланца

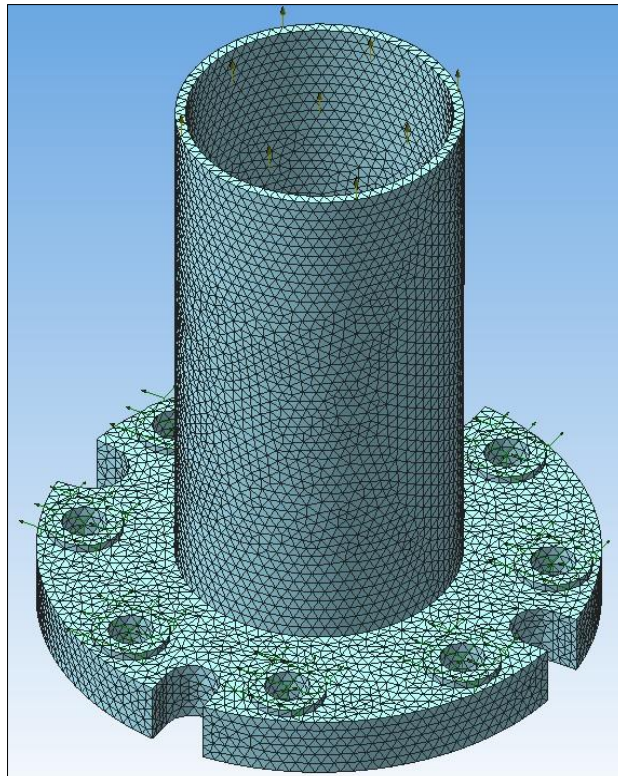
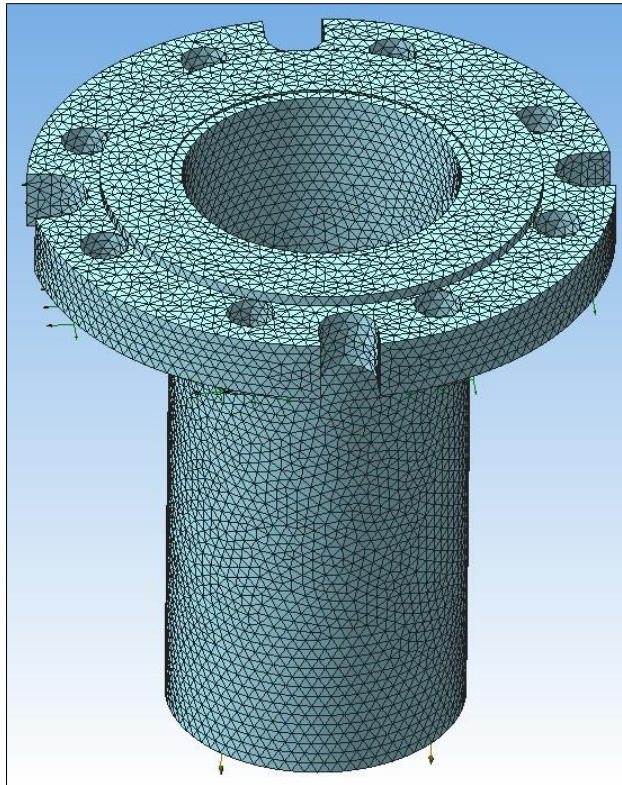


Рис. 2. Расчетная модель фланца с разбивкой на конечные элементы, закреплениями и приложенной нагрузкой

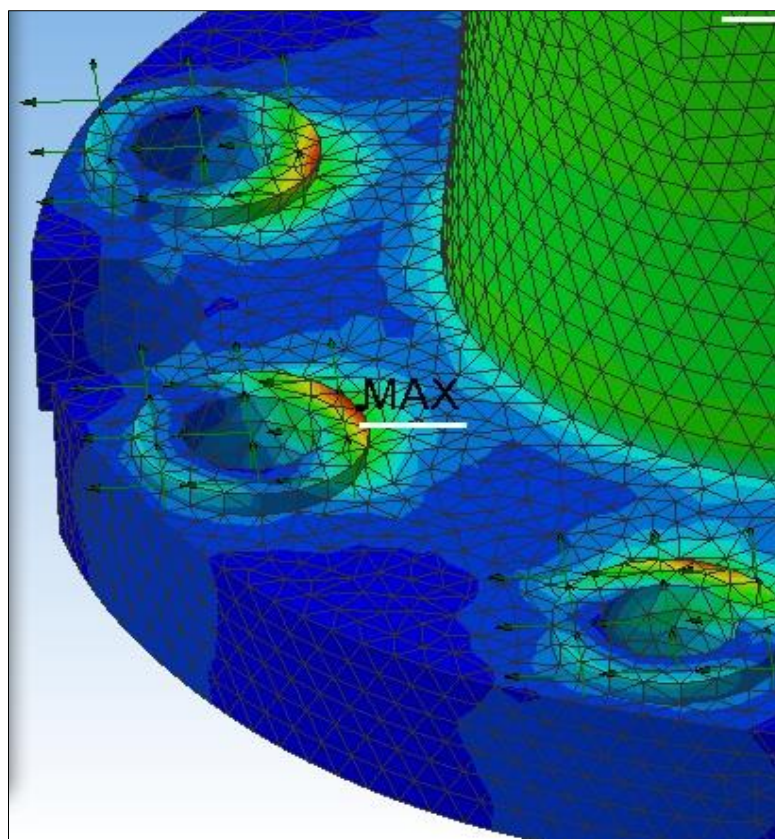
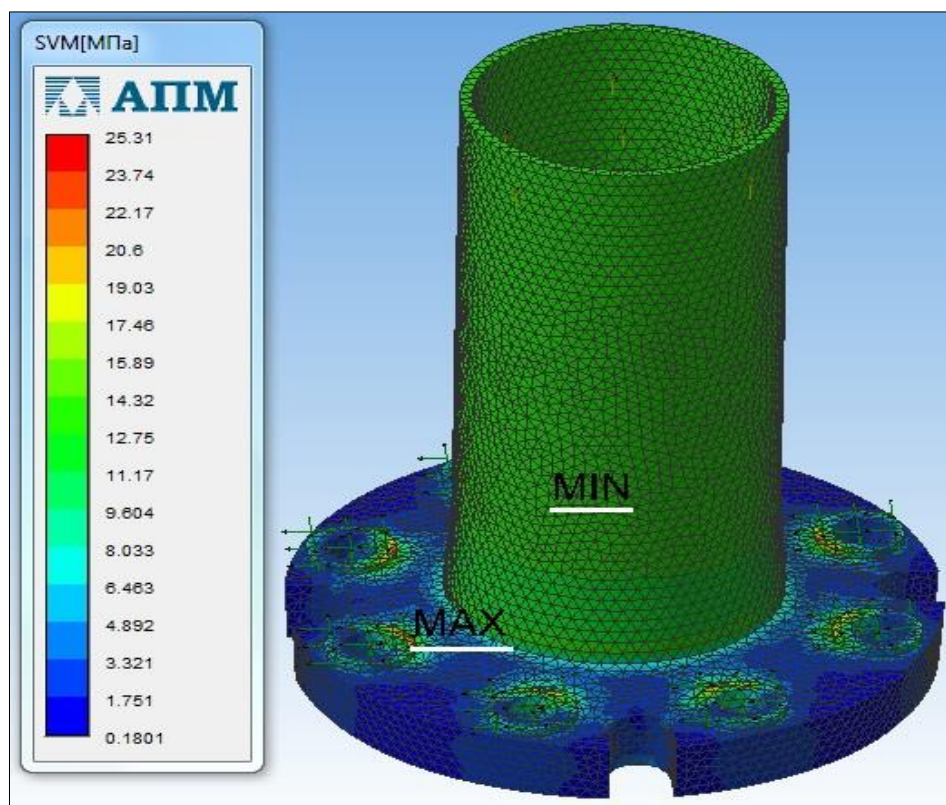


Рис. 3. Поля распределения напряжений по пластине фланца и примыкающего участка трубы при загрузении по варианту «а»

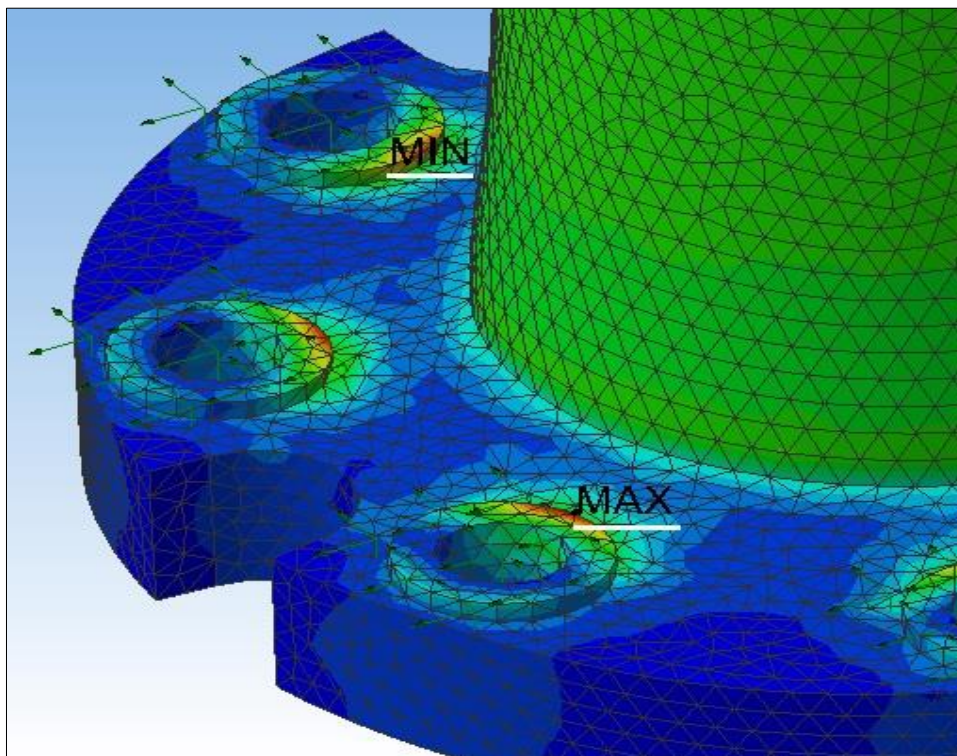
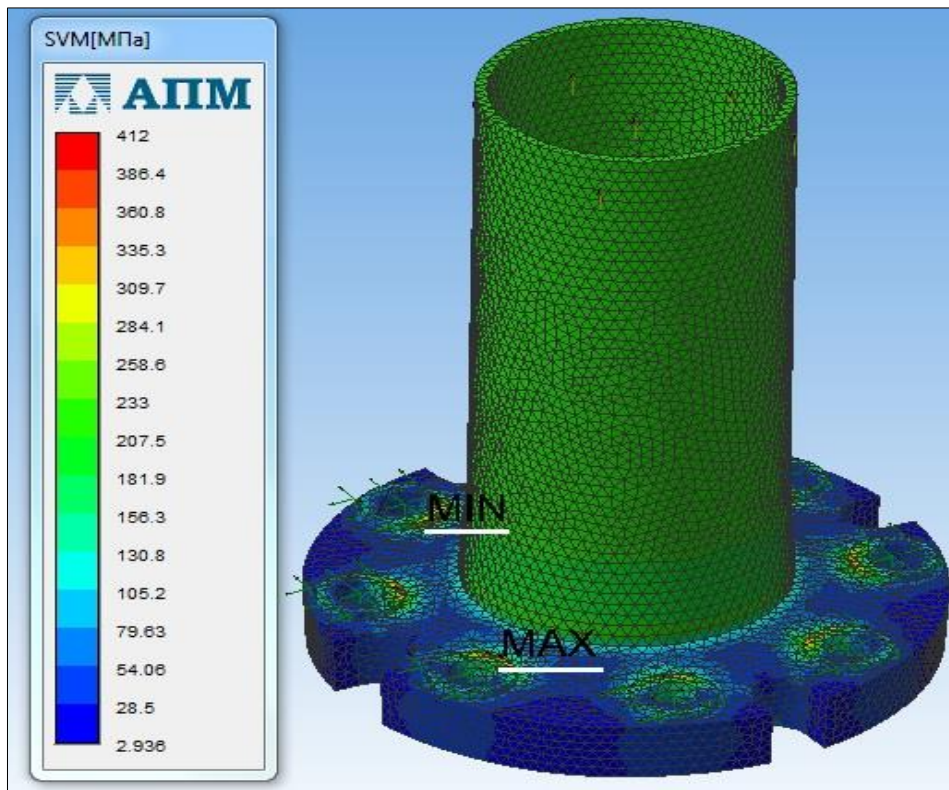


Рис. 4. Поля распределения напряжений по пластине фланца и примыкающего участка трубы при загрузении по варианту «b»

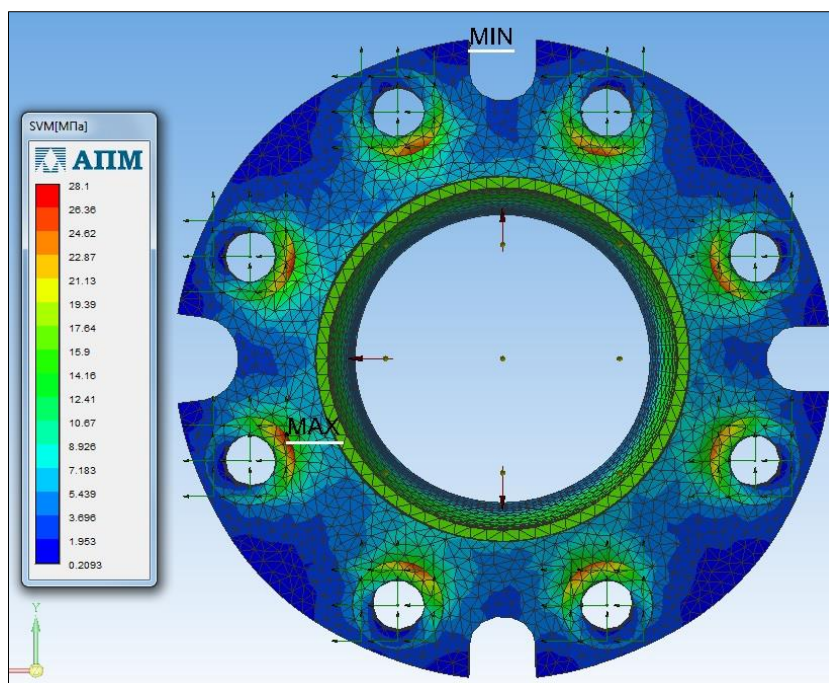
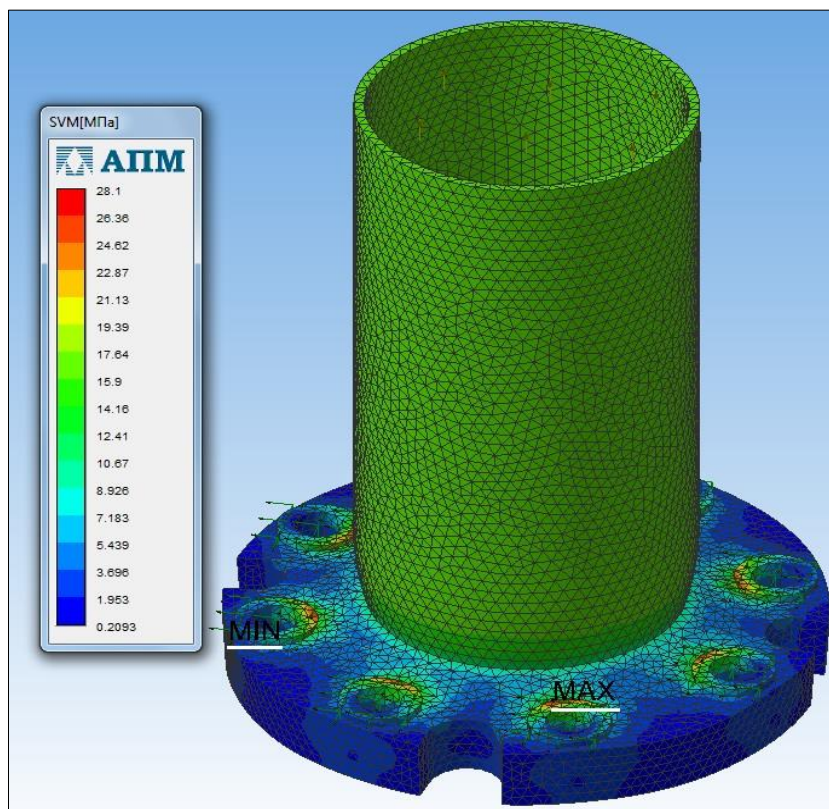


Рис. 5. Поля распределения напряжений по пластине фланца и примыкающего участка трубы при загрузке по варианту «с»

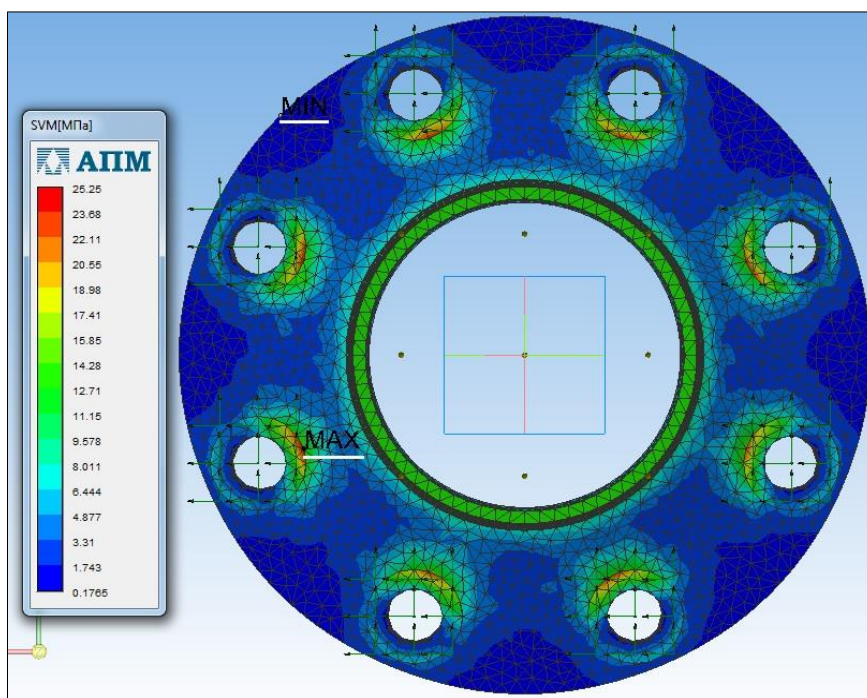
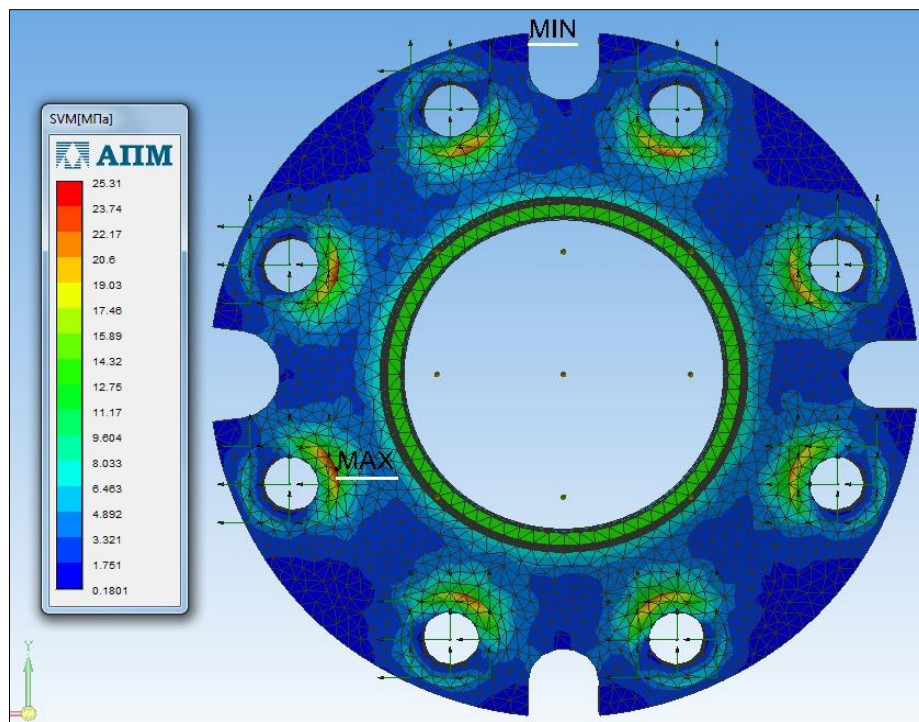


Рис. 6. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния фланцевой пластины с выточками и при их отсутствии



следует отметить, что при уменьшении расстояния между границей отверстия под болт и краем технологической выточки, рабочие напряжения возрастают. В этой связи при увеличении размеров выточек или отверстий под болты максимальный уровень напряжений будет иметь место на участках перемычек между ними и являться определяющим при оценке прочности фланцевой пластины.

3. Уровень напряжений в трубе (см. рис. 3 цв. вклейки), полученных численным методом, полностью соответствует уровню напряжений, подсчитанному ручным способом с использованием классических приемов сопротивления материалов $\left(\frac{N}{A} = \frac{17,65327}{13,07} = 1,35 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}, \text{ или } 13,5 \text{ МПа}\right)$, где N – максимальное расчетное значение растягивающей продольной силы в трубе, численно равно весу водоподъемной колонны с учетом веса столба воды; A – площадь поперечного сечения трубы.

В этой связи можно с уверенностью констатировать, что полученные результаты картин распределения напряжений и в пластине фланца являются достоверными и объективно характеризуют ее напряженное состояние.

4. Учет дополнительной нагрузки от внутреннего давления в трубе (14 атмосфер), возникающего от работы погружного насоса, приводит к общему увеличению напряжений в элементах расчетной модели на 2–2,5 МПа (0,2 – 0,25 кН/см²) (рис. 5 цв. вклейки). Суммарные максимальные напряжения в этом случае достигают величины 28,1 МПа, что существенно меньше заявленного предела текучести стали для фланца (195 МПа) и трубы (216 МПа).

5. В зоне сварного шва крепления фланцевых пластин к трубе (рис. 5 цв. вклейки) максимальные напряжения составляют 8,9 МПа (89 кН/см²), что не превышает величину расчетного сопротивления материала сварного шва даже при условии выполнения ручной сварки электродами Э42, для которых $R_{\omega_f} = 180 \text{ МПа}$ (18,0 кН/см²).

6. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния фланцевой пластины с выточками и при их отсутствии проиллюстрирован на рис. 6 цв. вклейки. Увеличение напряжений в характерных зонах пластины фланца при наличии выточек не превышает 1–2 % в сравнении с напряжениями в тех же областях пластины, выполненной без технологических выточек.

7. Фланцевое соединение выполнено на восьми болтах М16×80 (P80A2Din 933) класса прочности 5.6. В соответствии с таблицей Г.5 СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции», расчетное сопротивление болтового соединения растяжению $R_{bt} = 225 \text{ МПа}$ (22,5 кН/см²). Площадь поперечного сечения болта нетто $A_{bn} = 1,57 \text{ см}^2$. Требуемое количество болтов в соединении:

$$n \geq \frac{N}{N_{bt}} = \frac{N}{R_{bt} \cdot A_{bn}} = \frac{17,65327}{22,5 \cdot 1,57} = 0,5.$$

В рассматриваемом фланцевом соединении установлено 8 болтов. Таким образом, при рассматриваемом загрузении несущая способность болтового соединения будет обеспечена с большим запасом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций / СО Стальмонтаж,



Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт Промстальконструкция, Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций имени Н. П. Мельникова. – Москва : ЦБНТИ, 1988. – 83 с. – Текст : непосредственный.

2. Допустимые усилия в узлах решетчатых конструкций без элементов жесткости при примыкании раскосов к стенке поясов из прокатного профиля : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.01 / Вернер Франк. – Москва, 1977. – 167 с. : ил. – URL: <http://www.dslib.net>. – Текст : электронный.

3. Брудка, Я. Трубчатые стальные конструкции / Я. Брудка. – Москва : Стройиздат, 1975. – 209 с.

4. Перельмутер, А. В. Расчетные модели фланцевых соединений узлов металлических конструкций и их программная реализация в «SCAD Office» / А. В. Перельмутер, Э. З. Крискунов, В. В. Юрченко. – Текст : непосредственный // CADMaster. – 2010. – № 3. – С. 110–115.

5. Расчет узлов стальных конструкций компонентным методом конечных элементов. – URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20749. – Текст : электронный.

6. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции : актуализированная редакция СНиП II -23-81*. – Москва : НИЦ «Строительство», 2017. – Текст : непосредственный.

7. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования. – Москва.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 2017. – 158 с.

8. Лампси, Б. Б. Исследование напряженно-деформированного состояния фланцевых соединений / Б. Б. Лампси, Ю. Д. Маркина. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2020. – С. 11–16.

LAMPSI Boris Borisovich, candidate of technical sciences, associate professor, holder of the chair of theory of structures and technical mechanics; LAMPSI Boris Borisovich, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the chair of theory of structures and technical mechanics

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE FLANGED JOINT OF THE WATER-RAISING COLUMN UNDER THE PROJECT “ABOVE-GROUND PART OF THE UNDERGROUND WATER INTAKE FOR TECHNOLOGICAL WATER SUPPLY OF THE PIPE ROLLING SHOP OF JSC “VYKSA METALLURGICAL PLANT”

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia.

Tel.: +7 (831) 430-54-96, +7 (831) 433-98-64;

e-mail: lampsi@yandex.ru, boris-lampsi@yandex.ru, poluektoff@bk.ru

Key words: flange assembly, stress-strain state.

The article analyzes the stress-strain state of the flange connection of the lifting column. Flange assemblies are calculated in APM FEM for various loading options and various geometry of the flange plate. The calculation results are compared.

REFERENCES

1. Rekomendatsii po raschyotu, proektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu flantsevykh soedineniy stalnykh stroitelnykh konstruktсий / SO Stal'montazh, VNIPI Promstalkonstruktсий, TsNIPISM im. Melnikova. – Moscow : TsBNTI, 1988. – 83 p.



2. Verner F. Dopustimye usiliya v uzлах reshychatykh konstruksiy bez elementov zhyostkosti pri primykaniy raskosov k stenke poyasov iz prokatnogo profilya [Allowable forces in units of lattice structures without stiffeners when braces adjoin the wall of belts made of rolling profile] : diss. ... cand. tekhn. nauk : 05.23.01. – Moscow, 1977. – 167 p. : il. – URL : <http://www.dslib.net>.
3. Brudka Ya. Trubchatye stalnye konstruksii [Tubular steel structures]. – Moscow: Stroyizdat, 1975, 209 p.
4. Perelmuter A. V., Kriskunov E. Z., Yurchenko V. V. Raschyotnye modeli flantsevykh soedineniy uzlov metallicheskih konstruksiy i ikh programmaya realizatsiya v “SCAD Office” [Design models of flange connections of metal structure assemblies and their software implementation in "SCAD Office"] // CADMaster. – 2010. – № 3. – P. 110–115.
5. Raschyot uzlov stalnykh konstruksiy komponentnym metodom konechnykh elementov [Calculation of assemblies of steel structures by the finite element component method]. – URL : http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20749.
6. SP 16.13330.2017. Stalnye konstruksii [Steel structures]. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp II -23-81* – Moscow : NITs «Stroitelstvo», 2017.
7. SP 294.1325800.2017. Konstruksii stalnye. Pravila proektirovaniya [Steel Structures. Design rules]. Moscow : TsNIISK im. Kucherenko, 2017. – 158 p.
8. Lampsy B. B., Markina Yu. D. Issledovanie napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya flantsevykh soedineniy [Research of the stress-strain state of flange joints]. Privolzhiyskiy nauchnyy zhurnal [Privolzhiyskiy Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2020. P. 11–16.

© Б. Б. Лампси, Б. Б. Лампси, 2023

Получено: 08.06.2023 г.