DOI: 10.31660/0445-0108-2019-1-58-66

УДК 621.98

Сравнительный анализ расчетов врезки в трубопровод на проектируемом комплексе ЭЛОУ-АВТ Омского нефтеперерабатывающего завода на основе 3D-моделирования

И. Н. Квасов[1], М. А. Александров[2], А. В. Занин[1], М. Ю. Земенкова[2]*

[1]*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*
[2]*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия*
** e-mail: muzemenkova@mail.ru*

Аннотация. В работе рассмотрен вопрос о напряжениях, возникающих при врезке ответвления в основную магистраль. Проведены расчеты в ручном режиме и при помощи отечественного программного продукта СТАРТ, специализируемого на расчетах трубопроводов. Для решения поставленной задачи спроектирована 3D-модель трубопроводов, которая визуализирована при помощи программного продукта Intergraph SmartPlant 3D. Полученные результаты позволили установить наиболее оптимальные характеристики врезки трубопровода и на основании моделирования влияния нагрузок на показатели прочности врезки выявить необходимость использования усиления данной врезки. В ходе проведенных исследований рассмотрены различные аспекты прочностных расчетов, а также особенности использования специализированных программных продуктов. Экспериментальный расчет был реализован при проектировании комплекса ЭЛОУ-АВТ Омского нефтеперерабатывающего завода.

Ключевые слова: расчет врезки трубопровода; расчет на прочность; 3D-моделирование; программный продукт СТАРТ; программный продукт Intergraph SmartPlant 3D

Comparative analysis of tie-in calculations for the pipeline at the designed CDU/VDU complex of the Omsk refinery based on 3D modeling

Igor N. Kvasov[1], Michael A. Aleksandrov[2], Andrey V. Zanin[1], Maria Yu. Zemenkova[2]*

[1]*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*
[2]*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia*
** e-mail: muzemenkova@mail.ru*

Abstract. The article is devoted to the problem of strength loads when inserting a branch into the main line. We have carried out the calculations in manual form and with the help of a domestic software product START, specializing in pipeline calculations. 3D model of pipelines was designed to solve the problem

and 3D model visualized using software product the Intergraph SmartPlant 3D. The results obtained in the development of the model made it possible to establish the most optimal characteristics of the pipeline tie-in for strength loads and to identify the need to use reinforcement of this tie-in. In the course of the research we have studied significant aspects of strength calculations, as well as features of usage of specialized software products. The calculation was used in the actual design of the CDU/VDU complex of the Omsk refinery.

Key words: calculation of tie-in for the pipeline; calculation for strength; 3D modeling; software product START; software product Intergraph SmartPlant 3D

Введение

При проектировании, строительстве и реконструкции объектов нефтеперерабатывающей промышленности зачастую необходимо производить монтаж с врезкой в существующий трубопровод. Если объект спроектирован и построен достаточно давно, то тип врезки не может быть определен по классу трубопроводов, и его необходимо рассчитать для данных технологических параметров [1–5].

Для экспериментального расчета был выбран факельный коллектор диаметром 1 400 мм и врезка проектируемого трубопровода кислого факельного газа диаметром 600 мм комплекса установки электролизного обессоливания и обезвоживания — атмосферно вакуумной трубчатки, установки замедленного коксования и комплекса глубокой переработки нефти Омского нефтеперерабатывающего завода (ЭЛОУ-АВТ, УЗК и КГПН Омского НПЗ).

Исследование заключалось в определении достоверности результатов, полученных с помощью специализированных программных продуктов и, соответственно, стандартных ручных расчетов.

Цель работы — выбор оптимального способа расчета врезки ответвления в трубопровод, определение условий, при которых необходимо усиление врезки, а также проведение расчетов на прочность.

Объект исследования

Характеристика	Коллектор факельного газа — 8031-FA-1802-CC6-HW	Трубопровод кислого факельного газа — 8031-FA-1901-CC6-HW
Условный диаметр *Dy,* мм	1 400	600
Наружный диаметр *D,* мм	1 420	630
Толщина стенки *S,* мм	14	8
Материал трубопровода	Сталь 20	
Тип трубопровода и деталей	Электросварной	
Расчетная температура *T,* ^{0}C	400	
Расчетное внутреннее избыточное давление *P*, МПа	0,39	

Постановка численного эксперимента/результаты

Численный эксперимент проводился в соответствии с методикой и алгоритмом в двух реализациях: 1) в ручном режиме с применением Microsoft Excel; 2) в автоматизированном режиме с использованием программного продукта СТАРТ (далее ПП СТАРТ).

Рассмотрим некоторые особенности методики и алгоритма расчета конструктивных параметров врезки и оценки напряженного состояния. Согласно

ГОСТ 32388-2013 [1] расчетная толщина стенки магистрали (мм) во врезках при действии внутреннего избыточного давления (рис. 1) определяется по формуле

$$s_{RM} = \frac{|P| \cdot D}{2\min(\varphi_y; \varphi_d) \cdot [\sigma] + |P|}, \quad (1)$$

где P — расчетное внутреннее избыточное давление, МПа; D — наружный диаметр трубы или детали, мм; φ_y — коэффициент прочности продольного сварного шва при растяжении; φ_d — коэффициент прочности элемента, ослабленного отверстием; $[\sigma]$ — допускаемые напряжения при расчетной температуре, МПа.

Расчетное давление и наружный диаметр трубы — исходные данные для расчета. Допускаемое напряжение при расчете труб и соединительных деталей трубопровода на статическую прочность рассчитывают по формуле

$$[\sigma] = \min\left(\frac{\sigma_{B/t}}{2,4}, \frac{\sigma_{p/t} \text{ или } \sigma_{0,2/t}}{1,5}, \frac{\sigma_{2\cdot10^5/t}}{1,5}, \frac{\sigma_{1/2\cdot10^5/t}}{1,0}\right), \quad (2)$$

где $\sigma_{B/t}$ — минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при растяжении при расчетной температуре t ^{0}C, МПа; $\sigma_{p/t}$ — минимальное значение предела текучести при расчетной температуре t ^{0}C, МПа; $\sigma_{0,2/t}$ — минимальное значение условного предела текучести при расчетной температуре t ^{0}C, МПа; $\sigma_{2\cdot10^5/t}$ — условный предел длительной прочности на ресурс $2\cdot10^5$ часов при расчетной температуре t ^{0}C, МПа; $\sigma_{1/2\cdot10^5/t}$ — условный предел ползучести при растяжении, обусловливающий деформацию в 1 % за $2\cdot10^5$ часов при расчетной температуре t ^{0}C, МПа.

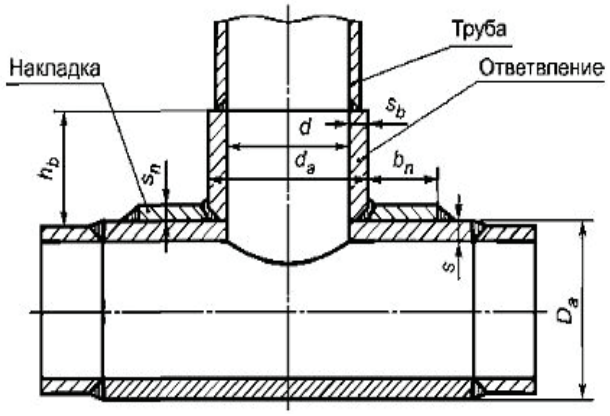

Рис. 1. ***Схема врезки в магистраль***

Нормативные значения $[\sigma]$ допускается принимать для электросварных труб и деталей по ГОСТ 14249-89 [2].

Коэффициент прочности φ_y принимается по нижеприведенной таблице для соединений, сваренных встык при растяжении от давления одним из следующих способов дуговой сварки: автоматической, полуавтоматической или ручной, и обеспечивающих полный провар по всей длине стыкуемых элементов при проведении радиографического контроля шва или ультразвукового по всей длине шва.

[1] ГОСТ 32388-2013. Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия. – Введ. 2014-08-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 114 с.

[2] ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. – Введ. 90-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 55 с.

Коэффициенты, определяющие прочность элемента со сварным швом при его растяжении

Сталь и способ сварки	φ_y при расчетной температуре	
	510 ^{0}C и менее	530 ^{0}C и более
Углеродистая, низколегированная, марганцовистая, хромомолибденовая и аустенитная при любом способе сварки	1,0	1,0
Хромомолибденованадиевая и высокохромистая:		
• при электрошлаковой сварке	1,0	1,0
• при электронно-лучевой сварке	1,0	0,9
• при ручной дуговой сварке, контактной стыковой сварке, автоматической стыковой сварке под флюсом	1,0	0,7

При расчетной температуре от 510 до 530 ^{0}C значение коэффициента φ_y определяется линейным интерполированием между указанными в таблице значениями.

Расчетный коэффициент снижения прочности магистрали врезки, ослабленной укрепленным отверстием, φ_d определяется по формуле [6]

$$\phi_d = \frac{2}{1,75 + \dfrac{d}{\sqrt{(D_a - s + c)(s - c)}}} \left[1 + \frac{\sum A}{2(s-c)\sqrt{(D_a - s + c)(s - c)}} \right], \quad (3)$$

где d — внутренний диаметр штуцера (ответвления), мм; s — номинальная толщина стенки или фасонной детали, мм; c — суммарная прибавка к толщине стенки трубы, мм; $\sum A$ — сумма укрепляющих площадей штуцера и накладки (если таковая имеется), мм^2.

Суммарная прибавка к толщине стенки трубы определяется по формуле

$$c = c_1 + c_2 , \quad (4)$$

где c_1 — технологическая прибавка, равная минусовому отклонению толщины стенки по стандартам и техническим условиям, мм; c_2 — прибавка для компенсации коррозии и эрозии, принимаемая согласно РД 10-249-98 [3] или отраслевым документам с учетом расчетного срока эксплуатации, мм.

Сумма укрепляющих площадей штуцера и накладки определяется по формуле

$$\sum A = A_b + A_n , \quad (5)$$

где A_b — укрепляющая площадь штуцера, мм^2; A_n — укрепляющая площадь накладки, мм^2.

Укрепляющая площадь штуцера A_b для наружных штуцеров, конструкция которых соответствует рисунку 1, определяется по формуле

$$A_b = 2h_b\left[(s_b - c) - s_{0b}\right], \quad (6)$$

где h_b — расчетное значение высоты внешней части штуцера, мм; s_b — номинальная толщина стенки штуцера, мм; s_{0b} — минимальная толщина стенки, мм.

Для врезок минимальная толщина стенки s_{0b} определяется по формуле

[3] РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. – Введ. 2001-09-01. – М. – 2010. – 344 с.

$$s_{0b} = \frac{P \cdot d_i}{2[\sigma] - P}. \quad (7)$$

Используемое при расчете значение высоты штуцера принимается по чертежу на конкретный штуцер, однако не более приведенного ниже значения

$$h_b = h_{bS} = 1{,}25\sqrt{(d - s_b)(s_b - c)}, \quad (8)$$

где d — наружный диаметр, мм.

Укрепляющая площадь накладки (в соответствии с рисунком 1) определяется по формуле

$$A_n = 2b_n s_n, \quad (9)$$

где b_n — ширина накладки, мм.

Для электросварного шва магистрали принимаем [σ] = 92 МПа, для ответвления — [σ] = 78 МПа.

Коэффициенты прочности φ_y для стыковых сварных соединений при растяжении от давления составляет 1,0 (см. табл.).

Для определения расчетного коэффициента снижения прочности магистрали тройника (врезки), ослабленной укрепленным отверстием, φ_d рассчитываем по формуле (3).

Наружный диаметр трубы D = 1 420 мм, внутренний диаметр штуцера (ответвления) d_i = 614 мм.

Найдем суммарную прибавку к толщине стенки трубы c. Технологическая прибавка c_1 по стандарту для магистрального трубопровода согласно ГОСТ 20295-85 [4], —1,4 мм. Прибавка на коррозию и эрозию c_2 составляет 3 мм. Суммарная прибавка c составит 4,4 мм. Для ответвления технологическая прибавка c_1 согласно РД 10-249-98 [5] составляет 10 % от толщины стенки, а прибавка на коррозию и эрозию c_2 также составляет 3 мм, то есть

$$s_{0b} = \frac{0{,}4 \cdot 614}{2 \cdot 78 - 0{,}4} = 1{,}58 \text{ мм},$$

$$h_b = 1{,}25\sqrt{(630 - 8 + 3{,}8)(8 - 3{,}8)} = 64{,}08 \text{ мм},$$

$$A_b = 2 \cdot 64{,}084[(8 - 3{,}8) - 1{,}578] = 336{,}01 \text{ мм}^2,$$

$$\sum A = A_b = 336{,}01 \text{ мм}^2.$$

Расчетный коэффициент снижения прочности магистрали врезки, ослабленной укрепленным отверстием, φ_d находим по формуле (3)

$$\phi_d = \frac{2}{1{,}75 + \dfrac{614}{\sqrt{(1420 - 14 + 4{,}4)(14 - 4{,}4)}}}\left[1 + \frac{336{,}07}{2(14 - 4{,}4)\sqrt{(1420 - 14 + 4{,}4)(14 - 4{,}4)}}\right] = 0{,}33.$$

[4] ГОСТ 20295-85 Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов. Технические условия. – Введ. 1987-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 114 с.

[5] РД 10-249-98. – С. 150.

Определяем расчетную толщину стенки магистрали по формуле (1)

$$S_{RM} = \frac{0,4 \cdot 1420}{2\min(1,0;0,327) \cdot 92 + 0,4} = 9,37 \text{ мм}.$$

Номинальная толщина стенки магистрали s составляет 14 мм. Она должна соответствовать условию $s \geq s_{RM} + c$, то есть

$$s \geq 9,37 + 4,40 = 13,77 \text{ мм}.$$

Так как номинальная толщина стенки магистрали s = 10 мм, и условие запаса соблюдено, то при врезке трубопровода сброса факельных газов от нового оборудования в коллектор не нужно использовать накладку.

Для обеспечения заданной точности, а также упрощения и сокращения процедуры ручного счета реализация алгоритма выполнена с помощью Microsoft Excel. Исходные данные и результаты расчета в Microsoft Excel приведены на рисунке 2.

1	Параметр	Усл. Обознач.	Значение	Ед. измерения
2	расчетное внутреннее избыточное давление	P	0,40	МПа
3	наружный диаметр трубы или детали	D	1420,00	мм
4	расчетное кольцевое напряжение от внутреннего давления	[σ]	92,00	МПа
5	расчетное кольцевое напряжение от внутреннего давления	[σ]	78,00	МПа
6	коэффициент прочности элемента со сварным швом при растяжении	φ_y	1,00	-
7	расчетный коэффициент снижения прочности магистрали тройника (врезки)	φ_d	0,33	-
8	номинальная толщина стенки или фасонной детали	s	14,00	мм
9	сумма укрепляющих площадей штуцера и накладки	∑A	336,01	мм^2
10	внешний диаметр штуцера (ответвления)	d	630,00	мм
11	внутренний диаметр штуцера (ответвления)	d_i	614,00	мм
12	технологическая прибавка, равная минусовому отклонению толщины стенки по стандартам и техническим условиям	c_1	0,80	мм
13	прибавка на коррозию и эрозию	c_2	3,00	мм
14	суммарная прибавка к толщине стенки	c	3,80	
15	технологическая прибавка, равная минусовому отклонению толщины стенки по стандартам и техническим условиям	c_1	1,40	мм
16	прибавка на коррозию и эрозию	c_2	3,00	мм
17	суммарная прибавка к толщине стенки	c	4,40	
18	укрепляющая площадь накладки	A_n	0,00	мм^2
19	укрепляющая площадь штуцера	A_b	336,01	мм^2
20	номинальная толщина стенки штуцера	s_b	8,00	мм
21	минимальная толщина стенки	s_{0b}	1,58	мм
22	расчетные значения высоты внешней части штуцера	h_b	64,08	мм
23	расчетные значения высоты внутренней части штуцера	h_{b1}	25,63	мм
25	расчетная толщина стенки магистрали без накладки	s_{RM}	9,37	мм
26	расчетная толщина стенки магистрали с суммарной прибавкой	s_{RM}	13,77	мм

Рис. 2. ***Результаты ручного расчета врезки без накладки***

По расчету в ПП СТАРТ без использования накладки (рис. 3) при врезке трубопровода кислого факельного газа в коллектор факельного газа толщина стенки магистрали должна составлять 13,77 мм, что соответствует номинальному значению толщины стенки трубопровода s = 14 мм.

Обсуждение

Контрольная проверка результатов расчетов осуществлялась с применением программного продукта Intergraph SmartPlant 3D. В программе была построенаи визуализирована модель системы трубопроводов (рис. 4) с указанием параметров

напряженного состояния и конструкции. На рисунке 4 трубопровод кислого факельного газа диаметром 630 мм (*1*), коллектор факельного газа диаметром 1 420 мм (*2*). При построении модели учитывались вес трубы, узлы соединений трубы с неподвижными опорами.

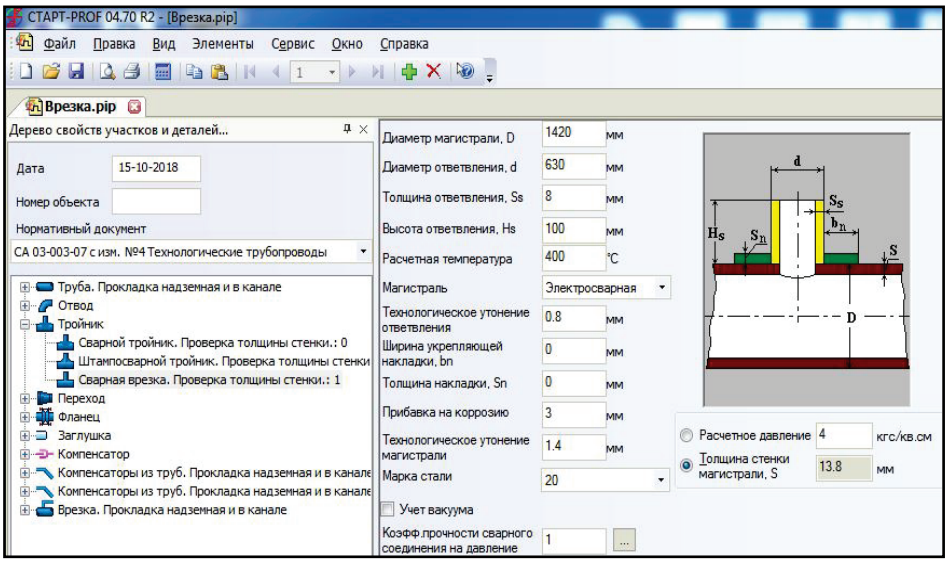

Рис. 3. ***Расчет врезки без накладки в ПП СТАРТ***

Рис. 4. ***Модель трубопроводов диаметрами 1 420 и 630 мм****:*
1 — трубопровод кислого факельного газа диаметром 630 мм;
2 — коллектор факельного газа диаметром 1 420 мм

Особенность проектирования в программном комплексе Intergraph SmartPlant 3D заключается в автоматизированном расчете нагрузок и сложных систем. Исходя из результатов имитационного моделирования (см. рис. 4), можно сказать, что трубопроводы с внешними диаметрами 1 420 и 630 мм выдерживают все расчетные нагрузки, так как используемая программа не позволила бы построить модель в случае невыполнения условий прочности [7].

На основании полученных результатов можно сказать, что трубопроводы с данными диаметрами могут быть использованыпри эксплуатации в заданных режимах работы. Конструктивные параметры врезки ответвления в основную магистраль обоснованы расчетами, подтверждающими возможность применения запроектированной врезки.

Выводы

Результаты проведенного исследования показали, что расчет врезки может быть выполнен как в ручном, так и в автоматизированном режиме с применением ПП СТАРТ, относительная погрешность результатов расчетов составила 0,3%.

Выбор технологии реализации алгоритма расчета в итоге зависит от нескольких факторов: количества врезок; сложности технологической схемы трубопроводов; граничных условий и наличия дополнительных условий расчета. В случае простой врезки и необходимости принятия типового конструкторского решения, достаточно и наиболее эффективно оперативное применение программы ПП СТАРТ. При анализе и проектировании сложных технологических схем трубопроводов и решении специфических задач проектирования (например, при наличии большого количества соединений в трубопроводах) потребуется аналитическое решение специалиста, при этом эффективным и более оперативным методом будет реализация алгоритма расчета в Microsoft Excel.

Библиографический список

1. Квасов И. Н. Анализ систем обнаружения утечек в магистральном нефтепроводе. Инженерное дело: Взгляд в будущее. – Омск, 2016. – С. 33–34.
2. Stress Analysis for the Tie-in Girth Weld of X90 / Yan Zhou [et al.] // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 50. – P. 889–893. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.850.889
3. Abid M., Siddique M. Numerical simulation of the effect of constraints on welding deformations and residual stresses in a pipe–flange joint / / Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2005. – Vol. 13, Issue 6. – P. 919-933.
4. Повышение надежности и эффективности технологического режима сети нефтесбора / Ю. Д. Земенков [др.] // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2011. – № 1. – С. 27–30.
5. Торопов С. Ю., Земенков Ю. Д., Подорожников С. Ю. Повышение экологической надежности ремонта трубопроводов в сложных природно-климатических условиях // Газовая промышленность. – 2015. – № S1 (720). – С. 95–98.
6. Занин А. В. Моделирование парной регрессии и проверка ее качества на основе анализа // Транспортное дело России. – 2017. – № 6. – С. 20–26.
7. Zanin A. V., Milke A. A., Kvasov I. N. Hydrocarbons pipeline transportation risk assessment / / Metrology, standartization, quality: Theory and practice (MSQ-2017) IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 998 (2018) 012043. – 2018. – Available at: https://doi.org/10.1088/1742–6596/998/1/012043.

Сведения об авторах

Квасов Игорь Николаевич, *к. э. н., профессор, декан факультета транспорта нефти и газа, Омский государственный технический университет, г. Омск, e-mail: inkv1@yandex.ru*

Александров Михаил Алексеевич, *к. т. н., доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: turaleksandrov@mail.ru*

Занин Андрей Владимирович, *аспирант кафедры гидромеханики и транспортных машин, Омский государственный технический университет, г. Омск, e-mail: zanin.andrew@gmail.com*

Земенкова Мария Юрьевна, *к. т. н., доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: muzemenkova@mail.ru*

Information about the authors

Igor N. Kvasov, *Candidate of Economics, Professor, Dean of the Faculty of Transport of Oil and Gas, Omsk State Technical University, e-mail: inkv1@yandex.ru*

Michael A. Aleksandrov, *Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, e-mail: turaleksandrov@mail.ru*

Andrey V. Zanin, *Postgraduate at the Department of Hydromechanics and Transport Machines, Omsk State Technical University, e-mail: zanin.andrew@gmail.com*

Maria Yu. Zemenkova, *Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, e-mail: muzemenkova@mail.ru*