

ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ЗАМЕНЫ МАТЕРИАЛА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБОРУДОВАНИЯ

Н.М. Захаров

(Уфимский государственный нефтяной технический университет)

Создание крупногабаритных объектов (колонны, емкости, резервуары, трубопроводы большого диаметра и т. д.) требует, в большинстве случаев, индивидуального подхода. Это, прежде всего, связано с их уникальностью, т. к. в каждом конкретном случае решается многоплановая задача по привязке объекта к процессу, другим объектам, технологическим системам, условиям эксплуатации, климатическим условиям и т. д. [1]. Кроме этого, необходимо выполнение ряда требований по обеспечению безопасности, снижению материалоемкости и повышению экономической эффективности [2].

Эти объекты (в дальнейшем ОК – оболочковые конструкции) должны удовлетворять условиям работоспособности, характеризующей такие важные свойства надежности изделий, как безотказность (сохранять работоспособное состояние в течение заданной наработки без вынужденных перерывов), долговечность (сохранять работоспособное состояние до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта), ремонтпригодность (приспособленность изделия к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонтов), сохраняемость (свойство изделия сохранять безотказность, долговечность и ремонтпригодность после и в течение установленного срока хранения и транспортирования) [3].

Так, уже на стадии проектирования, закладывается требуемый ресурс работоспособности объекта, который при изготовлении, хранении, транспортировании, монтаже и эксплуатации должен, как минимум, не снижаться. От качества проекта находятся в непосредственной зависимости возможность обеспечения показателей работоспособности ОК на стадии изготовления, поддержание и восстановление значений этих показателей соответственно в процессе эксплуатации и ремонта.

При разработке конструкции необходимо ориентироваться на использование стандартных узлов и деталей, на создание объекта простой формы, технологичного и удобного для изготовления. Также, что весьма важно, следует учитывать, что переделать проект гораздо легче, чем в последствии неоправданно тратить ресурсы на ремонт при эксплуатации.

В практике проектирования оболочковых конструкций, как и друго-

го оборудования нефтепереработки и нефтехимии, применяются два вида проектирования: в одну стадию и двухстадийное [4]. При этом выбор того или иного вида проектирования в каждом конкретном случае определяется на основании анализа информации о масштабах производства, для которого предназначен данный объект, его роли в технологическом процессе, предварительной оценки сложности объекта, предполагаемого объема проектных работ, а также в зависимости от технической и технологической оснащенности предприятия-изготовителя. Однако взаимоотношения между предприятиями машиностроительного и нефтехимического комплексов по удовлетворению потребностей последних в оборудовании зависят от ритмичности поставок материалов предприятиями металлургической промышленности. В связи с этим схемы одно- и двухстадийного проектирования напрямую реализуются редко. Часто проектные решения приходится корректировать непосредственно машиностроительному предприятию (МСП).

Это вызвано тем, что заказчик не всегда имеет возможность обеспечить МСП прокатом, комплектующими изделиями необходимого ассортимента. Использование собственных складских запасов ставит перед МСП задачу корректирования проекта, т. к. не всегда в резерве имеется листовый прокат из необходимого материала и требуемой толщины. В то же время, текущий запас, например, фланцев, патрубков, труб, днищ и т. д. также может не соответствовать проекту. Поэтому представленный для реализации технический проект претерпевает существенные изменения. Этого, к сожалению, в настоящих условиях производства заранее предусмотреть на стадии проектирования не представляется возможным.

Предприятие-изготовитель, а именно, конструкторы, технологи, экономисты и цеховые инженерные работники, после оценки заводских возможностей вынуждены выходить с предложениями к заказчику о необходимости внесения изменений в проекты (рисунок 1).

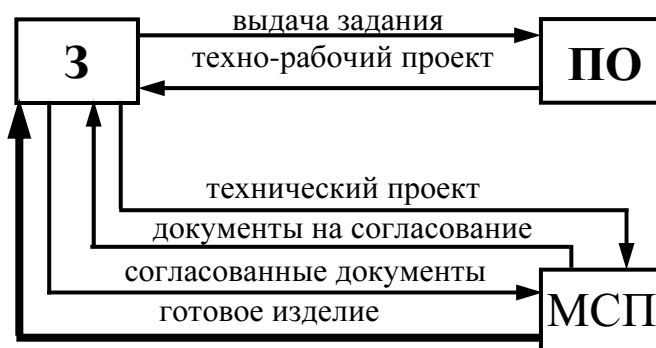


Рисунок 1- Схема проектирования и изготовления оборудования: З- заказчик; ПО- проектная организация; МСП- машиностроительное предприятие

Автором были проанализированы наиболее типичные конструктивные изменения (замена толщины стенки) и замены марок материалов листового проката и комплектующих изделий колонных аппаратов, которые были изготовлены в ОАО “Салаватнефтемаш” в период с 1992 по 1998 годы.

Обычно такие изменения в проекте обосновываются, наряду с оценкой технологических и ресурсных возможностей МСП, механическими расчетами и имеющимся опытом и согласуются с заказчиком.

Анализ статистических данных показывает, что чаще производится замена материалов обечаек, днищ, патрубков, люков и труб. Эти же конструктивные элементы, в основном, рекомендуются к изготовлению с большей толщиной стенки.

Оценка изменения вероятности безотказной работы колонн (по критерию статической прочности) в случае замены материалов некоторых конструктивных элементов (КЭ) и узлов выполнена по методу неперевышения нагрузки несущей способности элемента [5].

Согласно данному методу нагрузка R и несущая способность S приняты случайными величинами, распределенными по нормальному закону. Плотности распределения указанных величин определяются по следующим формулам:

$$f(R) = \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \exp\left[-(R - m_R)^2 / 2\sigma_R^2\right]; \quad (1)$$

$$f(S) = \frac{1}{\sigma_S \sqrt{2\pi}} \exp\left[-(S - m_S)^2 / 2\sigma_S^2\right], \quad (2)$$

где $f(R)$, $f(S)$ - плотности распределения нагрузки и несущей способности соответственно; m_R , m_S - максимальное ожидание нагрузки и несущей способности соответственно; σ_R , σ_S - среднеквадратическое отклонение нагрузки и несущей способности соответственно.

В качестве параметра состояния Z принята разность между несущей способностью и нагрузкой

$$Z = S - R. \quad (3)$$

Значения Z получаются посредством композиции нормальных распределений, вследствие чего они также распределены по нормальному закону с параметрами

$$m_Z = m_S - m_R; \quad (4)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_R^2 - 2\rho_{SR}\sigma_S\sigma_R},$$

где m_Z - математическое ожидание параметра Z ;

σ_Z - среднеквадратическое отклонение параметра Z ;

ρ_{SR} - коэффициент корреляции величин S и R .

В качестве действующей нагрузки приняты рабочие напряжения в

конструктивном элементе - σ_p , а в качестве несущей способности - предел текучести материала σ_T .

В этом случае коэффициент работоспособности равен

$$n = \frac{m_S}{m_R} = \frac{\sigma_T}{\sigma_p}. \quad (5)$$

Коэффициент вариации нагрузки и несущей способности соответственно равны

$$v_R = \frac{\sigma_R}{m_R} = \frac{\sigma_{\sigma p}}{\sigma_p}; \quad (6)$$

$$v_S = \frac{\sigma_S}{m_S} = \frac{\sigma_{\sigma T}}{\sigma_T}, \quad (7)$$

где $\sigma_{\sigma p}$ и $\sigma_{\sigma T}$ - среднеквадратические отклонения рабочих напряжений и предела текучести соответственно.

В качестве приемлемого допущения считаем, что коэффициенты вариации σ_R и σ_S стабильны и могут приниматься по прототипам. Кроме того, R и S приняты независимыми, т. е. $\rho_{SR} = 0$.

При принятых условиях вероятность неразрушения конструктивного элемента колонны определяется выражением

$$P(z > 0) = \Phi \left[\frac{n - 1}{\sqrt{n^2 v_S^2 + v_R^2}} \right], \quad (8)$$

где $\Phi(\cdot)$ - функция Лапласа.

Вероятность неразрушения определена при нормативном коэффициенте запаса работоспособности (запаса прочности) $n = 1,5$ [6].

Значения предела текучести и его коэффициенты вариации приняты по прототипам [5] и приведены в таблице 1.

Таблица 1- Статистические характеристики конструкционных материалов

Материал	σ_T , МПа	$v_{\sigma T}$, %	Материал	σ_T , МПа	$v_{\sigma T}$, %
ВСт 3 сп 5	250	8,00	17 Г1С	360	--/--
Ст 3 сп 4	250	--/--	09Г2С	350	--/--
Ст 3 сп 5	250	--/--	12Х18Н10Т	360	11,58
Ст 3 сп 3	250	--/--	Сталь 20	250	7,58
ВСт 3 сп 4	250	--/--	10 Г2	360	
16 ГС-12	330	--/--			
17 ГС	350	--/--			

В первом приближении нагрузка считается детерминированной, т. е. $v_R = 0$. Тогда выражение (8) приводится к виду

$$P(Z > 0) = \Phi \left[\frac{n-1}{n\nu_s} \right]. \quad (9)$$

Коэффициент запаса прочности (запаса работоспособности) n_{II} по проекту

$$n_{II} = \frac{\sigma_T^{II}}{\sigma_P}, \quad (10)$$

где σ_T^{II} - предел текучести материала элемента, используемого по проекту; σ_P - рабочие напряжения.

Коэффициент запаса прочности n_3 в случае замены материала при сохранении неизменной толщины стенки

$$n_3 = \frac{\sigma_T^3}{\sigma_P}, \quad (11)$$

где σ_T^3 - предел текучести заменяющего материала.

Тогда

$$\frac{n_{II}}{n_3} = \frac{\sigma_T^{II}}{\sigma_T^3}, \quad (12)$$

откуда

$$n_3 = n_{II} \cdot \frac{\sigma_T^3}{\sigma_T^{II}}. \quad (13)$$

Рассмотрим менее благоприятный случай, когда коэффициент запаса прочности равен нормативному, т. е. $n_{II} = n_T = 1,5$ [6].

В этом случае замена материала без смены толщины стенки приводит к следующему изменению вероятности неразрушения (таблица 2).

Таблица 2- Изменение вероятности неразрушения конструктивного элемента при замене материала

Материал		Вероятность неразрушения	
по проекту	изготовлено	P_{II}	P_3
16 ГС	ВСт 3 сп 5	>0,9999	0,9332
16 ГС	09Г2С	>0,9999	>0,9999
Ст 3 сп 4	09Г2С	>0,9980	>0,9999
Ст 3 сп 4	Ст 3 сп 5	>0,9999	>0,9999
Ст 3 сп 4	17Г1С	>0,9999	>0,9999
Ст 3 сп 5	09Г2С	>0,9999	>0,9999
Сталь 20	09Г2С	>0,9999	>0,9999
Сталь 20	10Г2	>0,9999	>0,9999
Ст 3 сп 4	10Г2	>0,9999	>0,9999
Ст 3 сп 3	Ст 3 сп 5	>0,9999	>0,9999

Здесь P_{II} и P_3 - вероятность неразрушения конструктивного элемента колонны при использовании материала по проекту и при замене его на имеющийся в наличии соответственно.

Вариант замены низколегированной стали 16ГС на углеродистую ВСтЗсп5 приводит к снижению вероятности неразрушения конструктивного элемента, что объясняется значительным различием прочностных свойств этих сталей при статическом нагружении. С этих же позиций можно объяснить повышение вероятности неразрушения при замене углеродистой стали СтЗсп4 на низколегированную 09Г2С.

Однако, учитывая, что углеродистая сталь, по сравнению с низколегированной имеет лучшие прочностные показатели в условиях малоциклового нагружения [7], для подтверждения целесообразности этих замен необходимо провести соответствующие механические расчеты.

Изменение вероятности неразрушения при замене толщины стенки рассматриваемых элементов оболочковых конструкций (патрубки, штуцера, обечайки) можно оценить при условии равенства расчетного напряжения окружному, т. е.

$$\sigma_{расч} = \frac{pD}{2S_{II}}, \quad (14)$$

где p - давление, МПа; D - внутренний диаметр элемента, мм;

S_{II} - толщина стенки по проекту, мм.

В случае изменения толщины стенки

$$\sigma_{расч}^1 = \frac{pD}{2S_3}, \quad (15)$$

где S_3 - толщина стенки элемента после замены, мм.

Тогда проектный и фактический запасы прочности

$$n_{II} = \frac{\sigma_T}{\sigma_{расч}} = \frac{2\sigma_T S_{II}}{pD} \quad \text{и} \quad n_3 = \frac{\sigma_T}{\sigma_{расч}^1} = \frac{2\sigma_T S_3}{pD}. \quad (16)$$

Отсюда

$$\frac{n_{II}}{n_3} = \frac{S_{II}}{S_3} \quad \text{и} \quad n_3 = n_{II} \frac{S_3}{S_{II}}. \quad (17)$$

Примем $n_{II} = n_T = 1,5$ [6]. Результаты расчета вероятности неразрушения в случае замены толщины стенки представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Изменение вероятности неразрушения при замене толщины стенки КЭ

S_3/S_{II}	P_3 - для КЭ из следующих материалов		
	16ГС, 17ГС, 09Г2С, 16Г2, Ст.3	12Х18Н10Т	Сталь 20
0,8	0,9812	0,9251	0,9860
0,9	0,9930	0,9845	0,9985
1,0	0,9991	0,9986	1,0000
1,1	0,9999	0,9996	-
1,2	-	0,9997	-

Анализ результатов расчетов (таблица 3) показывает, что изменение толщины стенки конструктивного элемента из стали 20 возможно как в сторону снижения (до 5..8 % по сравнению с проектной толщиной), так и в сторону увеличения. При этом вероятность неразрушения составляет порядка 0,999. Для низколегированных и хромоникелевой сталей такого резерва нет.

Очевидно, что изменение толщины необходимо рассматривать совместно с заменой материала элемента (рисунок 2).

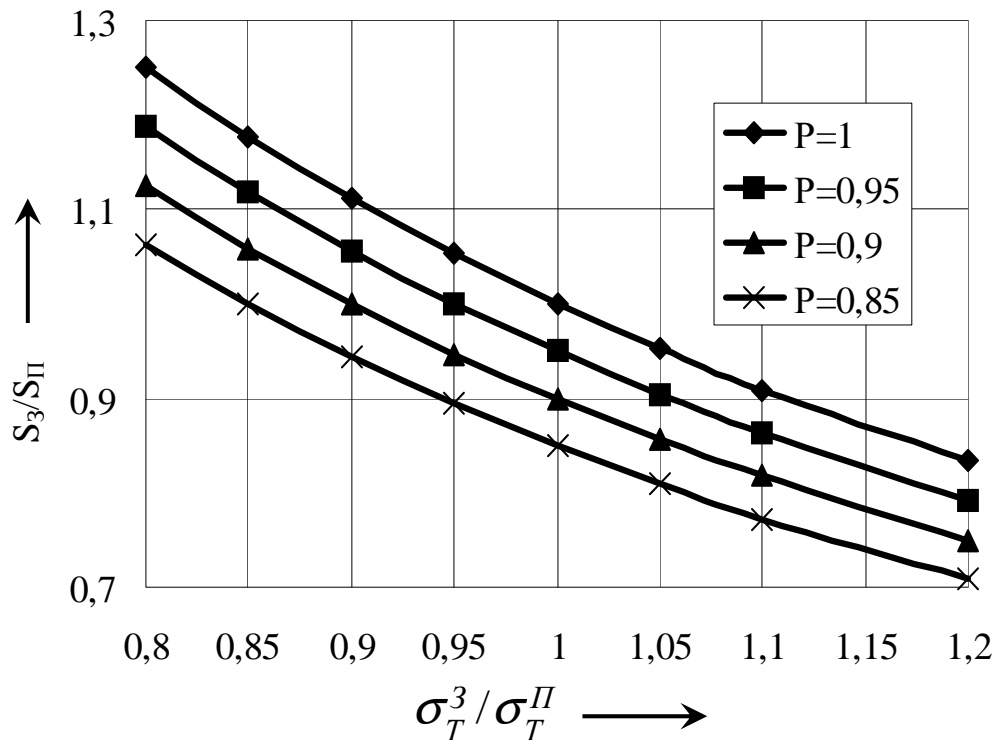


Рисунок 2- Вероятность неразрушения КЭ при изменениях в проекте

Это позволит обоснованно подходить к оценке правильности принятых решений и заранее прогнозировать вероятность неразрушения с учетом изменений в проекте. Однако при этом следует учитывать ряд обстоятельств. Так, замена низколегированной стали на углеродистую с увеличением толщины стенки элемента позволяет обеспечить резерв прочности в условиях малоциклового нагружения. Другие варианты замен необходимо тщательно анализировать по результатам соответствующих механических расчетов. В то же время, например, увеличение толщины стенки КЭ приводит часто к необоснованному завышению коэффициентов запаса прочности, увеличению металлоемкости и габаритов.

Современный уровень расчетно-экспериментального обоснования прочности конструкций, контроль качества металла и сварных соединений при изготовлении, монтаже и эксплуатации может способствовать значительной экономии средств за счет увеличения допустимого ресурса эксплуатируемой конструкции по сравнению с проектным путем применения более совершенных методов расчета на прочность и долговечность.

Данный подход к оценке изменений в техническом проекте (по вероятности неразрушения элемента), исходя из возможностей машиностроительного предприятия, может быть реализован уже на этапе согласований между заказчиком и проектной организацией. При этом необходима тесная взаимосвязь между последними.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никольс Р.В. Конструирование и технология изготовления сосудов давления: Пер. с англ.- М.: Машиностроение, 1975.- 464 с.
2. Ванчухина Л.И., Родионова Л.К., Шайнурова А.А. Организационно-экономическое обеспечение надежности функционирования промышленных систем.- Уфа: Изд-во Фонда содействия развитию научных исследований, 1997.- 180 с.
3. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения.
4. Рудин М.Г., Смирнов Г.Ф. Проектирование нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов.- Л.: Химия, 1984.- 256 с.
5. Сырицын Т.А. Надежность гидро- и пневмопривода.- М.: Машиностроение, 1981.- 216 с.
6. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
7. Зайнуллин Р.С., Бубнов В.А., Черных Ю.А. Снижение металлоемкости и повышение работоспособности кольцевых деталей химической и нефтяной аппаратуры.- М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1992.- 82 с.
8. Горынин И.В., Игнатов В.А., Звездин Ю.И. и др. Сопротивление разрушению сварных толстостенных корпусов высокого давления энерге-

тического оборудования. Сообщение 1. Статистический анализ дефектов и сопротивление разрушению корпусных материалов // Проблемы прочности.- 1985.- № 11.- С. 3-11.