

# Оценка и выбор компоновочного решения при разработке насосного оборудования для объектов использования атомной энергии с учетом компетентности привлекаемых экспертов

**Г.С. Виноградова**

аспирант Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; Санкт-Петербург

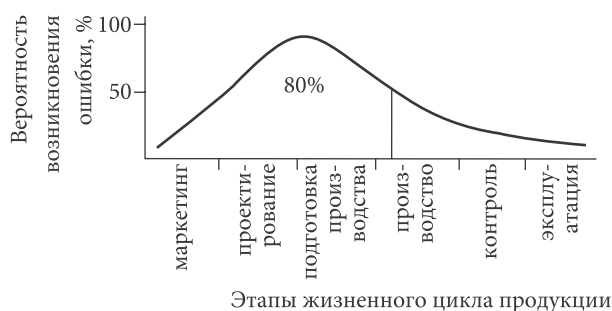
**А.В. Марков**

д.т.н, доцент, зав. кафедрой И2 Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; Санкт-Петербург

## Введение

Стандарт ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [1] содержит требования к основным процессам жизненного цикла продукции и услуг, внедряет понятие риск-ориентированного мышления. В первую очередь риск-ориентированное мышление целесообразно применять к процессу «проектирование и разработка продукции и услуг». Из рис. 1 видно, что чаще всего ошибки и несоответствия возникают на этапах проектирования и подготовки производства [2].

Риск-ориентированное мышление при разработке насосного оборудования для объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) целесообразно применять на начальном этапе проектирования – его можно назвать подэтап «тех-



**Рис. 1. Закон распределения ошибок на этапах жизненного цикла продукции**

ническое проектирование» т.к. именно на этом подэтапе решается задача выбора и утверждения компоновочного решения (компоновки) нового оборудования, зачастую не имеющего прототипов. Компоновочное решение главного циркуляционного насосного агрегата (ГЦНА), применяемого на ОИАЭ для перекачки теплоносителя, сложным образом влияет на надежность и безопасность, компактность, удобство обслуживания, стоимость, металлоемкость, выходные характеристики, конкурентоспособность проекта атомной станции в целом. Поэтому только сравнительный анализ компоновок по определенным параметрам позволит выбрать оптимальное решение.

Выбор оптимального компоновочного решения из множества вариантов с учетом ограничений – это задача многокритериальной оптимизации или теории принятия решений. Классы и методы решения задач теории принятия решений представлены в табл. 1 [3]. Сравнение компоновок – это неформальная задача и решается она методом экспертных оценок.

Таблица 1.

**Классы задач принятия решений и методы их решений**

Класс задач	Методы решения
Поисковые	Нелинейное программирование
Распределенные	Линейное программирование
Управление запасами	Теория управления запасами
Массовое обслуживание	Теория массового обслуживания
Календарное планирование	Теория расписания
Состязательные задачи	Теория игр
Неформальные задачи	Экспертный метод



Существуют различные методы обработки экспертных оценок, их анализ показал, что для оценки компоновок оборудования для объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) оптимальным по точности, трудоемкости и временным затратам является метод средневзвешенных экспертных оценок. На основе этого метода авторами статьи предложены классификатор параметров (показателей качества) насосного оборудования для ОИАЭ и методика обработки экспертных оценок компоновочного решения при разработке нового оборудования. В данной методике применен способ расчета с учетом связанных рангов при экспертных оценках.

**Актуальность работы.** Как уже отмечалось, компоновочное решение насосного оборудования, применяемого на ОИАЭ, сложным образом влияет на надежность и безопасность, компактность, удобство обслуживания, стоимость, металлоемкость, выходные характеристики, конкурентоспособность проекта АЭС в целом. В данной статье предлагается методика сравнения и анализа компоновочных решений по основным показателям качества с применением экспертной оценки. Согласованность мнений экспертов оценивается коэффициентом Кендалла.

**Описание методики.** На этапе технического проектирования рассматриваются несколько вариантов компоновок, их оценка проводится по определенным свойствам продукции, называемым показателями качества. Выбор количества показателей качества для оценки зависит от того, какая продукция оценивается и на каком этапе жизненного цикла (ЖЦ). Возможные варианты компоновок по каждому показателю качества оцениваются группой экспертов по принятой бальной системе. Производится расчет обобщенного показателя качества оцениваемой продукции. В рассматриваемой методике применяется метод расчета комплексного показателя качества путем усреднения оценок отдельных показателей с учетом коэффициентов их весомости – метод средневзвешенных [4, 5]. Таким образом, сравнение множества вариантов компоновки ( $k$ ) производится фиксированным числом экспертов ( $m$ ) по фиксированному количеству показателей качества ( $n$ ). Оценки выставляются экспертами по принципу:  $M_1$  балла – компоновка превышает требования технической спецификации (ТС) по  $n$ -му показателю качества,  $M_2$  балла – компоновка соответствует требованиям ТС по  $n$ -му показателю качества,  $M_3$  балла – компоновка не соответствует требованиям ТС по  $n$ -му показателю качества.

В таблице оценки в ячейке на пересечении показателя качества и номера оцениваемой ком-

поновки по принятой бальной системе проставляется оценка  $n$ -го показателя качества в  $k$ -й компоновке относительно требований, указанных в ТС. Оценки экспертов проставляются в таблицах вида *табл. 2*.

Показатели качества неравнозначно важны для утверждения оптимальной компоновки, поэтому проводится расчет весовых коэффициентов  $\alpha_j$ .

Расчет весовых коэффициентов выполняется следующим образом. Эксперты проводят ранжирование показателей качества. Оценка степени значимости показателей качества (технических характеристик) продукции для заказчика производится путем присвоения им рангового номера. Показателю качества, которому эксперт дает наивысшую оценку, присваивается ранг 1, показателю качества с наименьшей оценкой присваивается ранг  $n$ . Если эксперт признает несколько показателей качества равнозначными, то им присваивается одинаковый ранговый номер. На основе данных анкетного опроса составляется сводная таблица рангов (*табл. 3*).

Подсчитывается сумма рангов  $S_{Aj}$  по столбцам *табл. 3* по формуле:

$$S_{Aj} = \sum_{i=1}^m A_{ij} \quad (1)$$

где  $j$  – номер показателя качества;  $i$  – условный номер эксперта;  $A_{ij}$  – ранг  $j$ -го показателя качества, присвоенный  $i$ -м экспертом;  $m$  – число опрошенных экспертов.

Ранг  $A_{ij}$  – является показателем степени влияния (весомости)  $j$ -го показателя качества для оцениваемой продукции. Обработка результатов опроса позволяет провести первичную обобщенную ранжировку показателей качества. Первичный ранг  $R_{j(1)} = 1$  получает показатель качества  $j$  с наименьшей суммой рангов  $S_{Aj}$ .

*Таблица 2.*

### Оценка экспертов

№ п/п	Показатель качества	Эксперт № ( $m$ )			
		Номер оцениваемой компоновки			
		№1	№2	...	№ $k$
1	$Q_1$	$M_3$	$M_2$	...	$M_3$
2	$Q_2$	$M_1$	$M_3$	...	$M_3$
...	...	...	...	...	...
$j$	$Q_j$	$M_3$	$M_1$	...	$M_1$
$n$	$Q_n$	$M_2$	$M_1$	...	$M_1$

где  $Q_j$  –  $j$ -й показатель качества.

Таблица рангов

№ п/п	Показатель качества	Ранговые оценки показателей качества					Сумма рангов	Номер ранга в упорядоченном ряду $R_{j(1)}$	Номер ранга в упорядоченном ряду $R_{j(2)}$
		Эксперты (m)							
		1	2	...	i	m			
1	$Q_1$	$A_{11}$	$A_{21}$	...	$A_{i1}$	$A_{m1}$	$S_{A1}$	$R_{1(1)}$	$R_{1(2)}$
2	$Q_2$	$A_{12}$	$A_{22}$	...	$A_{i2}$	$A_{m2}$	$S_{A2}$	$R_{2(1)}$	$R_{2(2)}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
j	$Q_j$	$A_{1j}$	$A_{2j}$	...	$A_{ij}$	$A_{mj}$	$S_{Aj}$	$R_{j(1)}$	$R_{j(2)}$
n	$Q_n$	$A_{1n}$	$A_{2n}$	...	$A_{in}$	$A_{mn}$	$S_{An}$	$R_{n(1)}$	$R_{n(2)}$

При ранжировании показателей качества могут появляться связанные ранги (одинаковый ранговый номер). В этом случае проводят переформирование рангов, оно производится без изменения мнения эксперта, то есть между ранговыми номерами должны сохраниться соответствующие соотношения (больше, меньше или равно). Также ранг не может быть выше 1 и ниже значения, равного количеству параметров  $n$ . Если показатели качества  $Q_i, Q_{i+1}, Q_{i+2}$  имеют одинаковые ранги и разделяют соответственно места:  $(i), (i+1)$  и  $(i+2)$ , то их переформированный ранг будет равен:

$$A_{ij} = i + (\sum_{q=1}^t q) / t, \quad (2)$$

где  $i$  – порядковый номер по весомости первого из группы показателей качества, имеющих одинаковые ранги  $A_{ij}$ ;  $t$  – количество показателей качества с одинаковыми рангами;  $q$  – индекс увеличения места ранга.

После переформирования рангов по каждому специалисту их сумма по строке должна быть равна:

$$\sum_{j=1}^n A_{ij} = \sum_{j=1}^n j \quad (3)$$

Точно так же, как и при первичной обработке результатов опроса, определяются  $S_{aj}$  – суммы рангов по столбцам (1) и  $R_{j(2)}$  – вторичные ранги. Значение весового коэффициента  $\alpha_{ij}$  определяется по формуле:

$$\alpha_j = \frac{\beta_j}{\sum_{j=1}^n \beta_j}, \quad (4)$$

где  $\beta_j = \frac{1}{S_{Aj}}$ . (5)

Важно, что  $\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1$ .

Тогда табл. 2 оценки компоновочного решения  $m$ -м экспертом с учетом весовых коэффициентов примет вид табл. 4.

Суммарный коэффициент оценки и выбора компоновочного решения рассчитывается как сумма оценок с учетом весовых коэффициентов по каждому показателю качества для  $m$ -го эксперта и записывается в последнюю строку табл. 4. Обобщенный показатель качества  $K_{\text{суммк}}$  для  $k$ -го компоновочного решения рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{суммк}} = \frac{\sum_{i=1}^m K_k}{m}. \quad (6)$$

Компоновка с максимальным значением обобщенного показателя качества утверждается для дальнейшей конструкторской проработки.

Таблица 4.

Оценка экспертов с учетом весовых коэффициентов

№ п/п	Показатель качества	Эксперт № (m)			
		Номер оцениваемой компоновки			
		№1	№2	...	№ k
1	$Q_1$	$M_3 \times \alpha_1$	$M_2 \times \alpha_1$	...	$M_3 \times \alpha_1$
2	$Q_2$	$M_1 \times \alpha_2$	$M_3 \times \alpha_2$	...	$M_3 \times \alpha_2$
...	...	...	...	...	...
j	$Q_j$	$M_3 \times \alpha_j$	$M_1 \times \alpha_j$	...	$M_1 \times \alpha_j$
n	$Q_n$	$M_2 \times \alpha_n$	$M_1 \times \alpha_n$	...	$M_1 \times \alpha_n$
Суммарный коэффициент		$K_1$	$K_2$	...	$K_k$



При проведении экспертных оценок очень важно снизить субъективную составляющую оценки и сформировать компетентную экспертную группу. Для этого проводится количественная оценка согласованности мнений членов экспертной группы. Важно, что в экспертную группу должно входить от 3 до 15 специалистов [6]. Предположение о согласованности мнений экспертов проверим с помощью коэффициента Кендалла (коэффициента конкордации  $W$ ) [7,8]:

$$W = \frac{(12 * \sum_{j=1}^n D_j^2)}{m^2 * (n^3 - n) - m * \sum_{i=1}^m T_i}, \quad (7)$$

где  $D_j$  – отклонение суммы рангов  $A_{aj}$  для  $j$ -го показателя качества от общей средней суммы рангов  $A_a$ .

$$D_j = |A_{aj} - A_a|, \quad (8)$$

$$\text{где } A_a = (\sum_{j=1}^n A_{aj}) / n, \quad (9)$$

где  $T_i$  – параметр связи рангов во мнениях  $i$ -го эксперта.

$$T_i = \sum_{l=1}^{L_i} (t_l^3 - t_l), \quad (10)$$

где  $L_i$  – число связок (видов повторяющихся элементов) в оценках  $i$ -го эксперта,  $t_l$  – количество элементов в  $l$ -й связке для  $i$ -го эксперта (количество повторяющихся элементов).

Коэффициент конкордации принимает значения от 0 (мнения экспертов не согласованы) до 1 (полное согласие мнений экспертов). Статистическую значимость коэффициента  $W$  оценим при помощи критерия Пирсона  $X_p^2$  по формуле:

$$X_p^2 = m * (n-1) * W. \quad (11)$$

Предположение о наличии согласия между экспертами принимается, если  $X_p^2 > X_T^2$ .

$X_T^2$  определяется из табл. 3 [8] для принятой доверительной вероятности  $P$  или при заданном уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы  $f = n-1$ . Если  $X_H^2 < X_K^2$ , то необходимо провести повторное анкетирование, так как либо квалификация экспертов недостаточна, либо высока сложность оцениваемой продукции.

*Пример выбора конструкции с применением предложенной методики.*

Четыре эксперта анализируют три объекта с целью выбора наиболее оптимального для раз-

мещения в заданную компоновку. Например, проводится оценка конструкции «антиреверсное устройство» для дальнейшей проработки компоновки главного циркуляционного насосного агрегата (ГЦНА) (рис. 2 – 4).

Анализ проводится по семи показателям качества. Оценка выполняется по балльной шкале со следующими значениями: 4 – конструкция превышает заданные требования, оценка – хорошо; 2 – конструкция соответствует заданным требованиям, оценка – удовлетворительно; 0 – конструкция не соответствует заданным требованиям, оценка – отрицательно. Примеры опросных листов 2-х экспертов приведены в табл. 5 и 6.

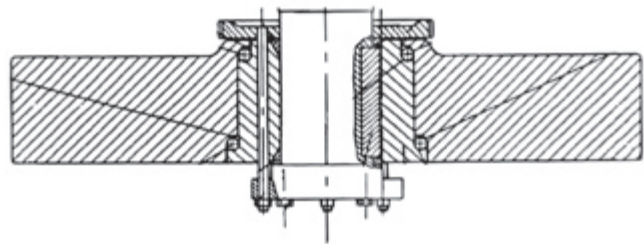


Рис. 2. Конструкция с коническими канавками

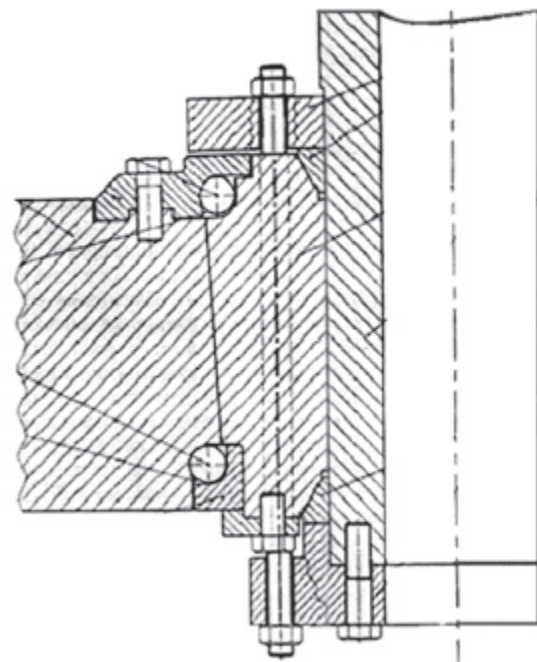


Рис. 3. Конструкция с конусовидной втулкой

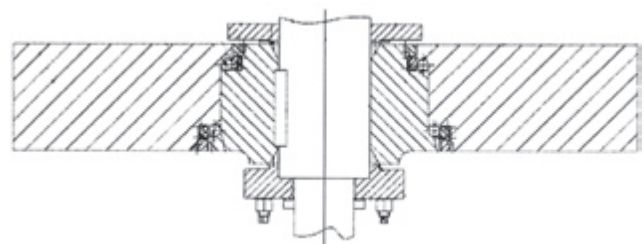


Рис. 4. Конструкция с сепаратором

Весовые коэффициенты показателей качества для 3-х оцениваемых конструкторских решений, рассчитанные по формулам 1-5, приведены в табл. 7.

Оценки комплексного показателя качества для каждой оцениваемой конструкции с учетом коэффициентов весомости из табл. 7 представлены в табл. 8 и 9.

Таблица 5.

Оценки эксперта № 1

Эксперт № 1			
Показатели качества оцениваемой продукции	Номер оцениваемой конструкции		
	№ 1	№ 2	№ 3
1. Доступность осмотра при эксплуатации	2	2	2
2. Безопасность обслуживающего персонала	4	4	4
3. Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания	2	2	2
4. Возможность отсоединения маховика от ротора	2	2	4
5. Взаимозаменяемость деталей	4	4	4
6. Защита от пробуксовывания маховика	2	0	2
7. Защита от нагрева	2	0	2

Таблица 6.

Оценки эксперта № 2

Эксперт № 2			
Показатели качества оцениваемой продукции	Номер оцениваемой конструкции		
	№ 1	№ 2	№ 3
1. Доступность осмотра при эксплуатации	2	2	0
2. Безопасность обслуживающего персонала	4	2	4
3. Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания	2	0	2
4. Возможность отсоединения маховика от ротора	2	4	4
5. Взаимозаменяемость деталей	4	2	4
6. Защита от пробуксовывания маховика	0	2	2
7. Защита от нагрева	2	0	2

Результат расчета обобщенного показателя качества по формуле 6 приведен в табл. 10.

Из табл. 10 (строка 2) можно сделать вывод, что для дальнейшей проработки конструкции

Таблица 7.

Весовые коэффициенты

Показатель качества	Весовой коэффициент
Безопасность обслуживающего персонала	0,2550
Защита от нагрева	0,2550
Защита от пробуксовывания маховика	0,2340
Возможность отсоединения маховика от ротора	0,1490
Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания	0,0745
Доступность осмотра при эксплуатации	0,0213
Взаимозаменяемость деталей	0,0106

Таблица 8.

Оценки эксперта № 1 с учетом весовых коэффициентов

Эксперт № 1			
Показатели качества оцениваемой продукции	Номер оцениваемой конструкции		
	№ 1	№ 2	№ 3
1. Доступность осмотра при эксплуатации	0,0426	0,0426	0,0426
2. Безопасность обслуживающего персонала	1,0200	1,0200	1,0200
3. Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания	0,1490	0,1490	0,1490
4. Возможность отсоединения маховика от ротора	0,2980	0,2980	0,5960
5. Взаимозаменяемость деталей	0,0424	0,0424	0,0424
6. Защита от пробуксовывания маховика	0,4680	0	0,4680
7. Защита от нагрева	0,5100	0	0,5100
Сумма баллов	2,5300	1,5500	2,8300
Ряд предпочтительности для 1-го эксперта	2	3	1



ГЦНА рекомендуется конструкция антиреверсного устройства № 3.

Проверим согласованность мнений экспертов расчетом коэффициента конкордации  $W$  по формуле (7). Результаты расчета приведены в табл. 11.

Таблица 9.

### Оценки эксперта № 2 с учетом весовых коэффициентов

Эксперт № 2			
Показатели качества оцениваемой продукции	Номер оцениваемой конструкции		
	№ 1	№ 2	№ 3
1. Доступность осмотра при эксплуатации	0,0426	0,0426	0
2. Безопасность обслуживающего персонала	1,02	0,51	1,02
3. Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания	0,149	0	0,149
4. Возможность отсоединения маховика от ротора	0,298	0,596	0,596
5. Взаимозаменяемость деталей	0,0424	0,0212	0,0424
6. Защита от пробуксовывания маховика	0	0,468	0,468
7. Защита от нагрева	0,51	0	0,51
Сумма баллов	2,06	1,64	2,79
Ряд предпочтительности для 2-го эксперта	2	3	1

Таблица 10.

### Результаты расчета обобщенного показателя качества

Обобщенный показатель качества для каждой из оцениваемых конструкций	2,07	1,75	2,41
Ряд предпочтительности экспертов	2	3	1

Таблица 11.

### Результаты расчета $W$

Значение коэффициента конкордации $W$	0,970
Оценка значимости коэффициента конкордации по критерию Пирсона (расчетное) $X_p^2$	23,350
Значение критерия Пирсона $X_T^2$ для числа степеней свободы $K = n - 1 = 7 - 1 = 6$ и при заданном уровне значимости $\alpha = 0,01$	16,812

Так как  $X_p^2$  расчетный 23,35 >  $X_T^2$  табличного (16,812), то  $W = 0,97$  – величина не случайная, а потому можно сделать вывод, что мнения экспертов согласованы, и, следовательно, рассчитанная оценка конструкции объективна.

## Выводы

Предложенная методика позволяет оценить согласованность мнений экспертов для выполнения экспертной оценки компоновки оборудования на соответствие требованиям технической спецификации. Принимаемое решение об утверждении компоновки подтверждается опытом экспертной группы и производится с заданной доверительной вероятностью  $P$  по таблице  $X_T^2$ -критерия (критерия Пирсона). Применение рассмотренной методики оценки компоновочного решения на этапе проектирования направлено на снижение затрат по устранению несоответствий на последующих этапах производства.

## Литература

1. Национальный стандарт Российской Федерации Системы менеджмента качества. Требования: ГОСТ Р ИСО 9001-2015 – М.: Стандартинформ, 2015.
2. Харрингтон Дж. Управление качеством в американских корпорациях. – М.: Экономика, 1990.
3. Мартемьянов Ю.Ф., Лазарева Т.Я. Экспертные методы принятия решений. Учебное пособие. – Тамбов, издательство ТГТУ, 2010г., 41с.
4. Хамханова Д.Н. Основы квалиметрии. Учебное пособие. – Улан-Уде, издательство ВСГУ, 2003, 142с.
5. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров. Основы квалиметрии. – М.: Экономика, 1982.
6. Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Организация и проведение экспертной оценки качества продукции: ГОСТ 23554.1-79/Система управления качеством продукции Государственный комитет стандартов Совета министров СССР. – Москва: Издательство стандартов, 1979, 28 с.
7. Иванищев Ю.Г. Априорное ранжирование факторов. Учебное пособие.- Хабаровск, издательство ТОГУ, 2013, 10 с.
8. Кэндел М. Ранговые корреляции. – М.: Статистика, 1974. 214 с.