

## ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА ОБОРУДОВАНИЯ

**Сафонов Борис Петрович,**

Новомосковский институт Российского

химико-технологического университета им. Д.И.Менделеева

05.02.01

boris\_safonov@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается методический подход к оценке технического совершенства производственного оборудования. Предложена структура обобщенного критерия технического совершенства оборудования.

**Ключевые слова:** оборудование, техническое совершенство, методология оценки, критерии оценки.

## THEORETICAL AND METHODOLOGICAL APPROACH TO THE ANALYSIS OF TECHNICAL PERFECTION OF THE EQUIPMENT

**Safonov Boris Petrovitch**

Russian D.I. Mendeleev University of Chemistry and Technology,

Novomoskovsk Institute

**Summary.** The article is devoted to the analysis of the methodological approach to the estimation of the technical perfection of production equipment. The structure of the generalized criterion of the equipment perfection is offered.

**Keywords:** equipment, technical perfection, assessment methodology, evaluation criteria.

В настоящее время в химической и других отраслях промышленности эксплуатируется однотипное оборудование (реакторы, теплообменники, силовые установки и др.), произведенное в разных странах. При этом отсутствуют объективные критерии сравнения технического совершенства однотипного оборудования, что затрудняет обоснованный выбор поставщика оборудования.

Вопросы оценки технического совершенства оборудования находятся в поле зрения специалистов в разных отраслях знания [1, 2]. При этом оценивается функциональность, надёжность, долговечность и другие компоненты совершенства оборудования, а также рассматриваются вопросы управления инновационной деятельностью.

В общем случае техническое совершенство можно оценить некоторым суммарным критерием  $KTC_{\Sigma}$

$$KTC_{\Sigma} = \sum KTC_i, \quad (1)$$

здесь  $KTC_{\Sigma}$  – суммарный критерий технического совершенства производственного оборудования;

$KTC_i$  – компонента критерия технического совершенства производственного оборудования.

Значение критерия  $KTC_{\Sigma}$ , определяемое из выражения (1) следует рассматривать как некий показатель, состоящий из ряда разнородных компонентов, знак суммы в выражении (1) при этом имеет только смысловое значение.

Основными компонентами  $KTC_{\Sigma}$  являются:  $KTC_{\phi}$  – критерий функциональности;  $KTC_{H}$  – критерий надёжности;  $KTC_{д}$  – критерий долговечности.

$KTC_{\phi}$  является главным компонентом  $KTC_{\Sigma}$ , он показывает степень приближения рассматриваемого оборудования к достигнутому уровню функциональности для данного вида оборудования (технологическое оборудование, транспортирующее, дробильное и др.). Для определения  $KTC_{\phi}$  можно использовать метод прецедентов, при котором значение  $KTC_{\phi}$  представляет собой отношение ве-

личины выбранного показателя функциональности ПФі (производительность, несущая способность и пр.) для рассматриваемого варианта к величине показателя функциональности ПФл признанных лидеров в данной области машиностроения.

$$KTC_{\phi} = \text{ПФі} / \text{ПФл} \quad (2)$$

Критерий функциональности при этом должен быть строго меньше единицы  $KTC_{\phi} < 1$ , в противном случае было неверно выбрана величина ПФл.

$KTC_{\text{H}}$  определяется методами теории надёжности применительно к рассматриваемому объекту [3,4]. Для анализируемого производственного объекта должно выполняться условие надёжности

$$KTC_{\text{Hи}} \geq [KTC_{\text{H}}] \quad (3)$$

здесь  $[KTC_{\text{H}}]$  – нормативное значение коэффициента надёжности для определённой группы производственных объектов.

Следует отметить, что оценка технического объекта по критерию надёжности  $KTC_{\text{H}}$  в настоящее время не может быть в полной мере реализована, т.к. отсутствуют систематизированные данные по нормативному уровню критерия надёжности  $[KTC_{\text{H}}]$  для различных групп производственных объектов и общепринятые методики определения критерия надёжности  $KTC_{\text{Hи}}$ .

Оценка технического совершенства производственного оборудования неразрывно связана с разработкой методов выбора материала деталей, определяющих работоспособность оборудования в целом.

Для химического машиностроения характерен широкий спектр параметров условий работы оборудования: давление до 30 МПа и выше в аппаратах высокого давления, температуры до 1000-1200°C в печах и до -260°C в установках разделения воздуха, коррозионно-активные среды в технологических агрегатах и трубопроводах, скорости скольжения в опорах компрессоров до 100 м/с при частотах вращения валов до 50000 мин<sup>-1</sup>. Причем возможны сочетания условий работы, делающие затруднительным выбор материала ответственных деталей (обечайки, реакционные трубы, рабочие колеса и пр.), опираясь на свойства конструкционных материалов, определяемые стандартными методами (прочность и пластичность по ГОСТ1497, твердость

по ГОСТ9013, ударная вязкость по ГОСТ9454, длительная прочность по ГОСТ10145 и др.).

При анализе условий работы деталей оборудования введём понятие функциональной нагрузки, под которой будем понимать внешние воздействия на конкретную деталь при штатных условиях эксплуатации. Функциональная нагрузка  $\Phi\text{H}_{\Sigma}$ , воспринимаемая деталью в процессе эксплуатации технического устройства, состоит из четырех компонентов нагружения – составляющих суммарной функциональной нагрузки [5]:

$$\Phi\text{H}_{\Sigma} = \Phi\text{H}_{\text{M}} + \Phi\text{H}_{\text{T}} + \Phi\text{H}_{\text{X}} + \Phi\text{H}_{\text{K}} = \sum \Phi\text{H}_{\text{i}} \quad (4)$$

Механический компонент  $\Phi\text{H}_{\text{M}}$  функциональной нагрузки имеет место, когда в процессе эксплуатации под действием приложенных к детали или передаваемых деталью сил происходит механическое воздействие на материал детали, приводящее к деформациям материала. Данный компонент функциональной нагрузки для большинства элементов технических устройств (обечайки, трубные решетки, валы, элементы передач, упругие элементы, опоры и др.) является основным, поскольку отказ, сопровождающийся разрушением материала детали разной степени локализации, происходит преимущественно в результате механического нагружения.  $\Phi\text{H}_{\text{M}}$  имеет размерность, соответствующую виду нагрузки: Н в случае сосредоточенной силы; Н·м в случае нагружения моментом силы при изгибе или кручении; Н/м, Н/м<sup>2</sup>, Н/м<sup>3</sup> в случае нагружения распределенными силами разной природы.

Наличие термического компонента  $\Phi\text{H}_{\text{T}}$  функциональной нагрузки материала детали обусловлено процессами старения материала под нагрузкой и выражается в разупрочнении или охрупчивании материала при рабочих температурах. При этом в материале наблюдается развитие либо ползучести (рабочие температуры выше  $0,3 \cdot t_{\text{пл}}$ ), либо хладноломкости (рабочие температуры ниже 0° С). Естественно, что  $\Phi\text{H}_{\text{T}}$  имеет размерность температуры: °С или К.

Химический компонент  $\Phi\text{H}_{\text{X}}$  функциональной нагрузки проявляется в химическом воздействии на материал детали со стороны рабочих и технологических сред, а в ряде случаев и атмосферного воздуха.  $\Phi\text{H}_{\text{X}}$  в общепринятом смысле не имеет размерности. В качестве показателя наличия в  $\Phi\text{H}_{\Sigma}$  химического компонента можно предложить

водородный показатель pH рабочей среды. При этом мы имеем лишь качественную оценку химического компонента функциональной нагрузки: pH = 7 – среда нейтральная, pH < 7 – среда кислая и pH > 7 – среда щелочная.

Контактный или трибологический компонент ФН<sub>к</sub> функциональной нагрузки обусловлен наличием в материале детали контактной деформации от нагружения. Нагружение в этом случае локализовано в поверхностном слое материала сопряженных деталей и обусловлено взаимодействием поверхностей деталей при относительном перемещении под нагрузкой. Данный компонент функциональной нагрузки является основным для подвижных соединений (трибосопряжений) деталей машин. Отказ трибосопряжений является основной причиной отказов неаварийного характера (≈ 90%) для транспортирующих и перемешивающих машин, а также других технических устройств подобного типа. В общепринятом смысле ФН<sub>к</sub> тоже не имеет размерности. Для характеристики ФН<sub>к</sub> можно

Как видно, компоненты функциональной нагрузки ФН<sub>1</sub> представляют собой разнородные физические величины, а два компонента ФН<sub>х</sub> и ФН<sub>к</sub> в общепринятом смысле не имеют размерности, поэтому знак суммы в выражении (4) не следует рассматривать как суммирование с нарастающим итогом. При наличии нескольких компонентов функциональной нагрузки ФН<sub>1</sub>, они накладываются друг на друга и тем самым усиливается суммарное ФН<sub>2</sub> воздействие на материал детали, условия работы детали становятся более жесткими.

В инженерной практике для характеристики сопротивления конструкционного материала определенной функциональной нагрузке разработан ряд показателей – эксплуатационных свойств (см. таблицу).

В работе [5] приведено 30 видов функциональной нагрузки деталей технических устройств и соответствующих им эксплуатационных свойств материалов. Естественно, что для многих видов ФН<sub>2</sub> отсутствуют методики определения соответ-

Таблица

Эксплуатационные свойства материалов

Вид ФН	Эксплуатационные свойства		Примечание
	Наименование	Показатель	
ФН <sub>М</sub> постоянная	Статическая прочность	Предел прочности $\sigma_B$ Предел текучести $\sigma_T$	Сосуды и аппараты высокого давления, быстровращающиеся диски и др.
ФН <sub>М</sub> переменная	Циклическая прочность	Предел выносливости, $\sigma_{-1}$	Шатуны, штоки, валы, зубчатые колеса
ФН <sub>М</sub> +ФН <sub>Т</sub> $t_{\text{раб}} > 0,3t_{\text{пл}}$	Жаропрочность	Предел ползучести $\sigma'_{\varepsilon/\tau}$ Предел длительной прочности $\sigma'_\tau$	Силовые детали печей, ДВС
ФН <sub>М</sub> +ФН <sub>Т</sub> $t_{\text{раб}} < 0^\circ\text{C}$	Статическая прочность + Хладостойкость	Предел текучести $\sigma_T$ Ударная вязкость КСУ или КСВ	Металлоконструкции, стоящие на открытой площадке
ФН <sub>х</sub>	Коррозионная стойкость	Скорость коррозии $v_k$	Технологическое оборудование, трубопроводы
ФН <sub>х</sub> +ФН <sub>Т</sub>	Жаростойкость	Глубина коррозии $h_k$	Детали горелок
ФН <sub>к</sub>	Сопротивление изнашиванию	Относительная износостойкость $\varepsilon$ Интенсивность изнашивания $I_h$	Элементы трибосопряжений, режущий инструмент, трубопроводная арматура

использовать комплекс величин, включающий в себя удельную нагрузку на контакте в Па; скорость скольжения на контакте в м/с, свойства материала контактирующих деталей и рабочей среды в соответствующих единицах измерения.

твующих эксплуатационных свойств, поэтому при сложном нагружении деталей интегральный показатель  $\sigma_\Sigma$  эксплуатационных свойств предлагается определять через некоторый базовый показатель  $\sigma_0$  и ряд поправочных коэффициентов

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_0 \cdot \prod x_{ij}, \quad (5)$$

здесь  $x_{ij}$  – коэффициент снижения базового показателя эксплуатационных свойств для  $i$  ведущего и  $j$  сопутствующего видов функциональной нагрузки.

При наличии сложной нагрузки базовый показатель  $\sigma_0$  определяется по стандартной методике, если таковая существует, или определяется по специальной методике, предложенной для данного вида функциональной нагрузки. После апробации специальная методика может быть стандартизована, например, методика определения энергоемкости при пластической деформации металлов по ГОСТ 23.218

Для примера рассмотрим определение  $\sigma_{\Sigma}$  для материала, используемого при изготовлении силовых деталей печей. В этом случае функциональная нагрузка  $\Phi N_{\Sigma}$  состоит из двух первых членов (4), т.е.

$$\Phi N_{\Sigma} = \Phi N_M + \Phi N_T \quad (*)$$

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_0 \cdot x_{MT} \quad (**)$$

В данном случае ведущим компонентом функциональной нагрузки является механический компонент, поэтому при  $x_{MT} = 1$ , т.е. при отсутствии осложняющего действия рабочих температур, базовый показатель будет, очевидно, представлять собой предел прочности материала по ГОСТ 1497, т.е.  $\sigma_0 = \sigma_B$

Для определения коэффициента снижения базового показателя эксплуатационных свойств матери-

ала необходима объективная информация о влиянии температуры на прочность конструкционного материала. Например, для изготовления силовых элементов печей используем жаропрочный сплав никоник ХН77ТЮР ГОСТ 5632. Температурная зависимость предела прочности сплава ХН77ТЮР имеет вид (свойства сплава взяты из [6,7]).

$$\sigma_B = 143 - 0,1 \cdot t_{\text{раб}}, \text{ кгс/мм}^2 \quad (6)$$

здесь  $t_{\text{раб}}$  – рабочая температура детали ( $t_{\text{раб}} = 400-800^{\circ}\text{C}$ )

Как известно, при рабочих температурах выше  $0,3 \cdot t_{\text{пл}}$  в конструкционном материале наблюдается явление ползучести, следовательно, при определении базового показателя  $\sigma_0$  необходимо учитывать временную зависимость прочности сплава для заданной рабочей температуры. Сплав ХН77ТЮР для рабочей температуры  $700^{\circ}\text{C}$  имеет следующий вид временной зависимости прочности.

$$\sigma_B = 81,2 \cdot \tau_{\text{нагр}}^{-0,1416}, \text{ кгс/мм}^2 \quad (7)$$

здесь  $\tau_{\text{нагр}}$  – время нагружения ( $\tau_{\text{нагр}} \leq 350$  часов)

Таким образом, оценка технического совершенства производственного оборудования является комплексной задачей, решение которой предполагается использовать критерий технического совершенства, характеризующий функциональность, надёжность и долговечность оборудования.

### Список литературы

1. Афанасьева Т.А., Блиничев В.Н. Надёжность химико-технологических производств. Иван. гос. хим.-технол. ун-т.: Иваново, 2007. – 199 с.
2. Гольдштейн Г.Я. Инновационный менеджмент. Таганрог: изд-во ТРГТУ, 1998. 132 с.
3. Зубова А.Ф. Надёжность машин и аппаратов химических производств. Л.: Машиностроение, 1978. – 214 с.
4. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надёжность машин. М.: Высшая школа, 1988. – 238 с.
5. Сафонов Б.П. Виды нагружения деталей и эксплуатационные свойства конструкционных материалов. Инженерная механика, материаловедение и надёжность оборудования. Сборник трудов НИ РХТУ, №5 (13), Новомосковск, 2004, с.15-22.
6. Марочник сталей и сплавов / В.Г.Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г.Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
7. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1977. – 647 с.