

**А.Н. ЖУКОВ**

### **ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПОИСКА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ТОРЦЕВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УПЛОТНЕНИЙ**

В статье представлена формализованная методика определения рационального варианта технологии изготовления элементов торцевых импульсных уплотнений (ТИУ), которая позволяет составить планы возможных комбинаций решений, минимизированные по трудоемкости реализации. Приведена модель синтеза интегрированной технологии, которая учитывает условия эксплуатации ТИУ, физические принципы работы оборудования и позволяет, в соответствии с технологическими ограничениями, формировать функциональные покрытия с заданными эксплуатационными свойствами на рабочих поверхностях элементов ТИУ.

**Ключевые слова:** торцовое импульсное уплотнение, формализация, функциональные покрытия, рациональный вариант технологии.

**О.М. ЖУКОВ**

### **ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПОШУКУ РАЦІОНАЛЬНОГО ВАРІАНТУ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ НА РОБОЧИХ ПОВЕРХНЯХ ТОРЦЕВИХ ІМПУЛЬСНИХ УЩІЛЬНЕНЬ**

У статті наведена формалізована методика визначення оптимального варіанту технології виготовлення елементів торцевих імпульсних ущільнень (ТИУ), яка дозволяє скласти плани можливих комбінацій рішень, що мінімізовані по трудомісткості реалізації. Наведено модель синтезу інтегрованої технології, яка враховує умови експлуатації ТИУ, фізичні принципи роботи обладнання і дозволяє, відповідно до технологічних обмежень, формувати функціональні покриття із заданими експлуатаційними властивостями на робочих поверхнях елементів ТИУ.

**Ключові слова:** торцеве імпульсне ущільнення, формалізація, функціональні покриття, раціональний варіант технології.

**A. ZHUKOV**

### **FORMALIZATION OF THE RATIONAL VARIANT SEARCH OF THE FORMING FUNCTIONAL COATINGS TECHNOLOGY ON THE FACE IMPULSE SEALS WORKING SURFACES**

The article presents a formalized method for determining a rational variant of the face impulse seals (FIS) elements manufacturing technology, which allows you to make plans for possible combinations of solutions, minimized by the complexity of the implementation. The model of the integrated technology synthesis is given, which takes into account the operating conditions of FIS, the physical principles of equipment operation and allows, in accordance with technological limitations, to form functional coatings with specified operational properties on working surfaces of FIS elements.

**Keywords:** impulse face seal, formalization, functional coatings, a rational variant of technology.

**Введение.** Одним из самых распространенных уплотнительных элементов, широко применяемых в насосах, компрессорах и различных химических аппаратах, является торцевое импульсное уплотнение (ТИУ) [1]. Оно представляет собой герметизирующее устройство, состоящее из двух деталей в виде колец – одно из которых вращается совместно с валом, а другое неподвижно, соединено с корпусом (рис. 1).



Рисунок 1 - Пример конструкции ТИУ фирмы «ТРИЗ»ЛТД, Украина

На торцах колец расположены плоские уплотняющие поверхности, изготовленные с высоким качеством, характеризующимся геометрическими параметрами, структурой, упрочнением, остаточными напряжениями и др.

На работоспособность уплотнений влияют конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы. Важнейшими из них являются свойства рабочей и окружающей сред, режимы работы, свойства материалов герметизируемого соединения и уплотнителя, допустимые пределы утечки, ресурс, общий срок эксплуатации, токсичность и химическая агрессивность сред [2].

**Постановка проблемы.** Необходимость использования системного подхода при проведении исследований требует анализа целесообразного использования направленного выбора технологий обеспечения требуемого качества поверхностных слоев колец на всех стадиях их жизненного цикла. Система направленного выбора технологии обеспечения требуемого качества рабочих поверхностей ТИУ охватывает весь их жизненный цикл, включающий в себя материал ТИУ и их элементов, технологию их изготовления, технологию ремонта и др. Все они рассматриваются через специальные методы направленного выбора. При этом необходимо учитывать влияние выбираемых методов

друг на друга, которое в конечном итоге будет сказываться на качестве изделия [3].

В настоящее время стало очевидным, что вопросы повышения износостойкости деталей трибосопряжений должны проводиться в тесной кооперации конструкторских, технологических и триботехнических решений. Правильный подбор материалов возможен только в том случае, если проведен анализ конструкционных и триботехнических характеристик узла трения и условий его работы.

На этапе конструкторской подготовки производства, при проектировании ТИУ, работающих в агрессивных средах с высокой коррозионной и химической активностью и в условиях экстремальных температур (от высоких к криогенным), важно знать методы, использование которых может обеспечить требуемые характеристики поверхности и в соответствии с этим назначать ее качественные показатели (технологическая рациональность конструкции). Как показывает практика производств таких методов может быть много [4].

**Методика исследований.** Учитывая особенности эксплуатации ТИУ, описанные [4,5] можно сформулировать требования к функциональным покрытиям, которые необходимо сформировать на их рабочих поверхностях (рис 2).



Рисунок 2 - Структура процедуры синтеза рациональной технологии формирования функциональных покрытий на поверхностях ТИУ

Так как задача выбора технологии формирования функциональных покрытий является инвариантной, т.е. реализуемой различными методами или их комбинацией, на первом этапе направленного выбора формируем матрицу достижимости решения задачи  $R = [r_i]$ , которая определяется следующим образом:

$$r_i = \begin{cases} 1, & \text{если вершина } P_0 \text{ достижима из } P_i, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases},$$

где  $P_0$  – решение задачи;  $P_i$  – элемент решения.

Так происходит отсев всех вариантов, которые не позволяют достичь необходимые требования (тупиковые варианты).

Оставшиеся, удовлетворяющие решению варианты, покажем в виде сетевой модели (рис 3). Сетевая модель представлена ориентированным графом, узлами которого являются этапы решения задачи, а ребрами трудоемкость их решения (технологическая себестоимость). Необходимо определить кратчайший путь из вершины  $P_0$  в вершину  $G_n^k$ . Для этого составляются планы прохождения пути, позволяющие решить задачу различными методами. На первом этапе разбивается множество всех путей, которые ведут из вершины  $P_0$  в вершину  $G_n^k$  на не пересекаемые подмножества. В качестве оценки  $\xi_i$ , возьмем длину ребер графа, являющимися частью пути, при этом для на полного пути всегда будет  $\geq \xi_i$  где  $i$  – номер конкретного этапа. Из этих подмножеств формируем планы реализации задачи в зависимости от условий эксплуатации ТИУ.

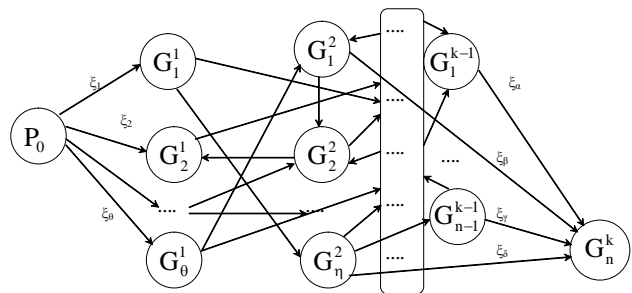


Рисунок 3 - Сетевая модель поиска варианта решения задачи

Далее результат поиска будет сводиться к решению задачи целочисленного программирования комбинаторного вида, то есть задачи, в которой решение ищется на конечном множестве возможных значений переменных. Наиболее распространенными среди комбинаторных методов является метод «ветвей и границ» [6].

Рассмотри задачу дискретного программирования с применением метода вервей и границ для условия поиска рационального варианта технологии формирования функциональных покрытий на поверхности элементов ТИУ в зависимости от условий их работы и свойств окружающей среды. Выбор рационального технологического процесса в конкретных производственных условиях выполняется в такой последовательности. Входными данными для проектирования является массив возможных вариаций технологий  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ , которые позволяют получить на поверхности ТИУ необходимое функциональное покрытие. Формирование массива производится с учетом требований к качеству

поверхности, ограничений по реализации технологического процесса. На следующем этапе определяется производственная себестоимость  $C_{n1}$  получения покрытия одного варианта технологического процесса из указанного выше массива  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ . После этого первому технологическому процессу присваивается статус базового технологического процесса  $n_0 = n = 1$  и соответственно его себестоимость есть минимальной, т.е.  $C_{n \min} = C_{n1}$ . Базовый технологический процесс исключается из массива  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ . Далее в цикле берется следующий технологический процесс из массива  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  под номером  $n = n + 1$  и определяется его производственная себестоимость  $C_n$ . Данный технологический процесс называем текущим. После этого сравнивается производственная себестоимость базового варианта и текущего варианта. Если себестоимость базового варианта меньше, чем текущего варианта, то текущий технологический процесс исключается из массива  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  и далее рассматривается следующий технологический процесс.

Если себестоимость текущего варианта меньше, чем базового, то текущему варианту присваивается статус базового, текущей себестоимости присваивается статус минимальной. Данный технологический процесс исключается из массива  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ .

После этого переходят к рассмотрению следующего технологического процесса из массива  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ . Таким образом, рассматриваются все технологические процессы, которые попали в массив возможных вариантов технологий  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ . По окончании цикла базовый вариант технологии будет являться рациональным для получения функционального покрытия на рабочей поверхности ТИУ в данных производственных условиях.

Процедура формирования массива технологий  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  представлена на рис. 4. На схеме приняты обозначения:  $\lambda'$ ,  $\varpi'$ ,  $\gamma'$ ,  $\beta'$  – количество доступных вариантов при каждом вхождении в цикл расчетов техпроцессов, технологического оборудования, методов формирования покрытий, комбинаций слоев соответственно.

Формирование массива  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  происходит следующим образом. Технолог, в режиме диалога, вводит материал кольца ТИУ. Далее с применением базы знаний рассматриваются возможные варианты функционального покрытия. Под каждый вариант выполняется подбор комбинаций слоев.

Имея вариант комбинации и используя базу данных, осуществляем поиск возможных методов формирования конкретного слоя покрытия.

Определив множество методов, в автоматическом режиме осуществляем подбор технологического оборудования (из состава, имеющегося на предприятии), позволяющего реализовать данный метод.

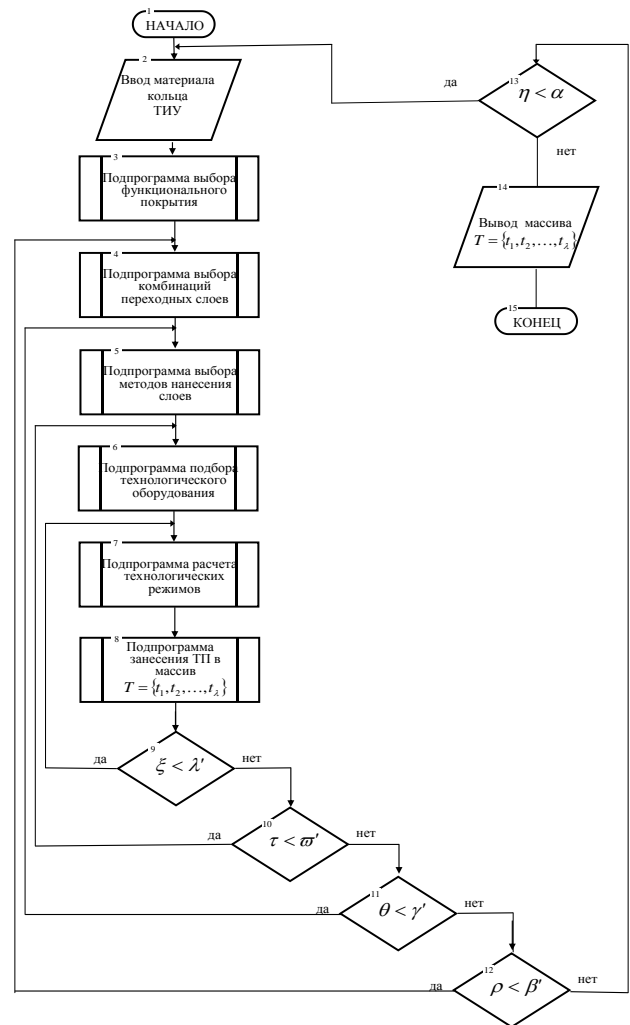


Рисунок 4 - Алгоритм формирования массива технологических процессов  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  получения функционального покрытия с заданными эксплуатационными свойствами на поверхности ТИУ

По каждому оборудованию выполняется расчет технологических режимов, нормирование операций и формирование данных для технологической документации. Каждому технологическому процессу присваивается свой индекс, под которым он заносится в базу данных массива  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ .

**Результаты исследований.** Процедура поиска рационального варианта технологии формирования функциональных покрытий на поверхности ТИУ выполняется согласно следующей методике.

*Шаг 1.* Под каждый вариант материала основы (МО) поверхности ТИУ формируется массив возможных комбинаций решений. Каждая ячейка матрицы представляет собой множество решений  $\{P_0\}$  в рамках одной  $m$  – комбинации для каждого  $v$  – го варианта материала кольца ТИУ.

*Шаг 2.* В соответствии с каждым вариантом решения задачи формируется матрица множества доступных методов ( $\{M\}$ ) по всем вариантам решения  $P_0$ . Каждая ячейка матрицы представляет собой  $\varphi$  – множество доступных методов  $\{M\}$  в рамках одной  $m$

– комбинации. Построение происходит для всех  $\nu$  комбинаций материала кольца ТИУ.

**Шаг 3.** Подбираем средства технологического оснащения, позволяющие реализовать конкретный метод, или их комбинацию при формировании функционального покрытия ТИУ. Каждый  $\theta$  - й метод можно реализовать  $\zeta$  - совокупностью средств технологического оснащения. В результате формируется матрица размерностью  $(\theta \times \zeta)$ .

**Шаг 4.** В зависимости от физических принципов работы оборудования, доступных технологических режимов, формируем матрицу вариантов технологических процессов формирования функциональных покрытий на поверхности ТИУ, удовлетворяющих заданным показателям качества согласно установленным технологическим ограничениям.

**Шаг 5.** В результате направленного выбора под каждый вариант материала кольца ТИУ, в зависимости от среды эксплуатации (условий работы ТИУ), формируется матрица технологий формирования функциональных покрытий.

**Шаг 6.** В рамках каждого «плана» поиска варианта решения задачи производится определение технологической себестоимости в условиях конкретного предприятия. План, имеющий минимальную себестоимость решения задачи принимается как оптимальный, в рамках своей комбинации вариантов решения, а из них формируется матрица минимизированных технологий реализации задачи (рис. 5).

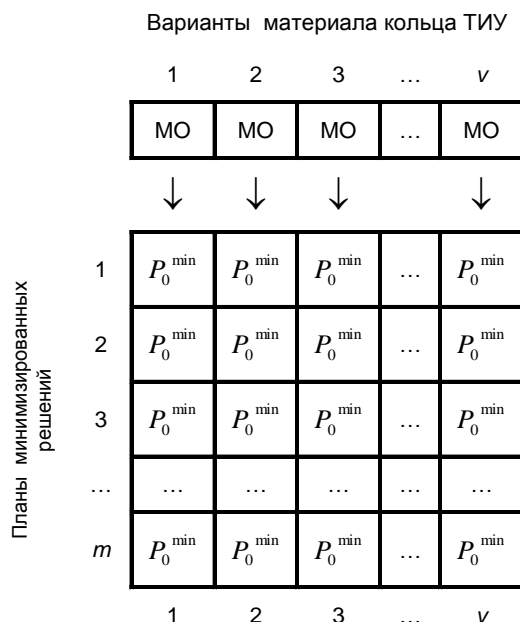


Рисунок 5 – Формирование матрицы планов минимизированных решений задачи получения функциональных покрытий на рабочих поверхностях ТИУ.

**Шаг 7.** Рациональный вариант технологии формирования функциональных покрытий на рабочих поверхностях ТИУ, с учетом совокупности доступных планов (в зависимости от среды эксплуатации ТИУ),

определяется из массива минимизированных решений согласно условию:

$$P_0^{opt} = \lim_{C_{mex} \rightarrow \min} P_0 | C_{mex} \in \{C_{P_0}\}.$$

**Выводы.** Приведенная формализованная методика определения рационального варианта технологии изготовления элементов торцевых импульсных уплотнений позволяет сгенерировать планы реализации возможных комбинаций решений. Результатом направленного выбора технологии, обеспечивающей требуемые эксплуатационные свойства рабочих поверхностей торцевых импульсных уплотнений насосного оборудования, будет минимизированный по критерию себестоимости технологический процесс формирования функциональных покрытий. При этом учитываются не только стоимостные, но и экологические характеристики процесса. Следует отметить, что экологические характеристики могут быть использованы в качестве самостоятельного критерия оптимизации при принятии предварительно отобранных экономически целесообразных вариантов.

#### Список литературы

1. Тарельник В.Б., Жуков А. Н., Коноплянченко Е.В., Белоус А.В., Волошко Т.П. Повышение надежности импульсных торцевых уплотнений. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. № 5. С. 43-54.
2. Данилейко О.В., Ладенко С.В., Жуков А.Н. Повышение надежности и эффективности торцевого уплотнения для компрессора углекислого газа. *Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. Сер.: Техн. в машинобудуванні. – Харків, 2018. № 1282, вип. 6. С.43-49.
3. Жуков А.Н. Направленный выбор технологии и установление критериев оценки наиболее рационального метода упрочнения колец торцевых уплотнений. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. Сумы. 2017. № 47, вып. 1. С. 15-20.
4. Tarel'nik, V.B., Martsinkovskii, V.S., Zhukov, A.N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 3 // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. V.53, pp. 385-389. doi: 10.1007/s10556-017-0351-5
5. Загоруйко А.В., Лісовенко Д.В., Марцинковський В.С. Розробка та дослідження торцевого запірного імпульсного ущільнення відцентрового компрессора // *Восточно – Європейський журнал передових технологій*. 2016. Т. 1, №7(79). С.30-39. doi:10.15587/1729-4061.2016.59884
6. Токарева В.І. *Математичне програмування*. Київ: Центр учбової літератури, 2007. 232с.

#### References (transliterated)

1. Tarel'nik V.B., Zhukov A. N., Konopljanchenko E.V., Belous A.V., Voloshko T.P. Povyshenie nadezhnosti impul'snyh torcevyh uplotnenij [Improving the reliability of pulse mechanical seals]. *Tekhnichnij servis agropromisloвого, lisovogo ta transportnogo kompleksiv*. 2016. no. 5, pp. 43-54.
2. Dany`lejko O.V., Ladenko S.V., Zhukov A.N. Povyshenie nadezhnosti i jeffektivnosti torcovogo uplotnenija dlja kompressora uglekislogo gaza [Improving the reliability and efficiency of the mechanical seal for a carbon dioxide compressor]. *Visn. Nacz. tehn. un-tu «XPI» Ser.: Techn. v mashy'nobuduvanni* [Bulletin of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute". Series: Technologies in mechanical engineering]. Kharkov, 2018. no.1282, issue 6, pp. 43-49.
3. Zhukov A.N. Napravlenyj vybor tehnologii i ustanovlenie kriteriev ocenki naibolee racional'nogo metoda uprochnenija kolec torcevyh uplotnenij [Directional selection of technology and the establishment of criteria for assessing the most rational method of hardening the

- rings of the face seals]. *Kompressorное i jenergeticheskoe mashinostroenie* [Compressor and power engineering ]. Sumy, 2017 no. 47, issue 1, pp. 15-20.
4. Tarel'nik, V.B., Martsinkovskii, V.S., Zhukov, A.N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 3. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017, vol. 53, pp. 385-389. doi: 10.1007/s10556-017-0351-5
  5. Zagorulko A.V. Lysovenko D.V., Martsinkovsky V.S. Rozrobka ta doslidzhennja torcovogo zapirnogo impul'snogo ushil'nennja vidcentrovogo kompressora [Development and research of the face shutter impulse seal of a centrifugal compressor]. *Vostochno – Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. 2016, vol. 1, no.7(79), pp.30-39. doi:10.15587/1729-4061.2016.59884
  6. Tokareva V.I. Matematichne programuvannja [Mathematical programming]. Kyiv, Centr uchbovoi literatury, 2007. 232p.

*Поступила (received) 04.03.2019*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Жуков Олексій Миколайович (Жуков Алексей Николаевич, *Aleksey Zhukov*)** – аспірант, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна; тел.: (050) 400-23-342, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7886-6993>; e-mail: [technology@i.ua](mailto:technology@i.ua)