

**П.А. Побегайло**

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЛОЖЕННЫХ СФЕР**

Рассмотрено практическое применение метода вложенных сфер при проектировании рабочего оборудования одноковшовых гидравлических экскаваторов на ранних стадиях проектирования. Суть метода состоит в ведении единого критерия качества, включающего в себя все локальные критерии (в данной работе рассмотрен частный случай с тремя критериями). Этот единый критерий качества назван нами энтропией. Чем меньше значение энтропии, тем качественнее рабочее оборудование. На этом основании процесс поиска подходящего варианта рабочего оборудования, есть процесс коллапса пространств (сфер) состояний рабочего оборудования (схлопывание сфер по направлению от наибольшей к наименьшей). Другими словами, поиск наилучшего варианта рабочего оборудования есть процесс редукции всех возможных векторов состояний рабочего оборудования к удовлетворяющему проектировщика варианту.

**Ключевые слова:** одноковшовый гидравлический экскаватор; рабочее оборудование; качество рабочего оборудования; метод вложенных сфер.

Предложенные в наших работах [1, 2 и др.] локальные критерии эффективности единичного варианта рабочего оборудования (РО) одноковшовых гидравлических экскаваторов (ОГЭ) могут быть использованы «как есть», т.е. по отдельности. Однако, вопрос о том, какой критерий лучше и точнее пока не решен и ответ на него выходит за границы настоящей работы.

Поэтому, не смотря на известные недостатки и критику такой методологии [3, 4 и др.], эти критерии можно свернуть в один, интегральный. Нам представляется допустимым это на стадии предпроектного анализа (ПА) [5–7 и др.] и в условиях развития и становления полной теории проектирования РО ОГЭ. В будущем конечно рассматриваемый сейчас вопрос требует уточнения и углубления, с учетом новейших достижений в теории принятия решения и пр.

В рамках настоящего раздела мы будем опираться на метод вложенных сфер (МВС), предложенный нами в работах [8–11 и др.] и развитый на-

шими украинскими коллегами в работе [12 и др.]. Идея данного метода был придумана автором настоящей работы при чтении монографии [13], а именно раздела о квантовой теории спина и применяемой там единичной сферы Римана.

В работах [1, 2 и др.] нами предложены три локальных критерия эффективности единичного варианта РО: коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$ , а также параметр  $V_{\text{эфф}}$ . Первые два критерия существуют в диапазоне от нуля до единицы, и они безразмерны, последний же всегда положителен и находится в некотором интервале своих экстремальных значений. Этот интервал гораздо шире единичного отрезка. Это создает определенные неудобства и поэтому необходимо этот третий критерий нормировать. Для этого преобразуем этот критерий в условную безразмерную величину по формуле:

$$K_3 = \frac{V_i}{V_{\max}}, \quad (1)$$

где  $V_{\max}$  – максимальное значение

критерия  $V_{\text{эф}}$ ;  $V_i$  – некоторое промежуточное значение критерия  $V_{\text{эф}}$ .

Из этого последнего соотношения очевидно, что параметр  $K_3$  так же существует в диапазоне от нуля до единицы.

Для еще большего удобства все три коэффициента  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  необходимо преобразовать по формулам:

$$K'_1 = 1 - K_1, \quad (2)$$

$$K'_2 = 1 - K_2, \quad (3)$$

$$K'_3 = 1 - K_3, \quad (4)$$

Таким образом, три параметра  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  образуют трехмерное фазовое пространство: пространство оценки качества<sup>2</sup> вариантов РО.

В графическом виде можно представить все это в виде набора вложенных друг в друга сфер, построенных на обозначенных трех осях ( $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ ), с различным значением радиус-вектора  $AB_i$  для каждой сферы (для каждого варианта РО).

Естественно, что одна сфера с радиус-вектором  $AB_i$  отражает состояние одного конкретного варианта РО. Аnsамбль таких сфер и составляет основу МВС, наглядно характеризуя итоги процесса проектирования РО (позволяет сравнивать различные варианты РО между собой).

Еще раз: значение радиус-вектора  $AB_i$  является определяющим как при построении одной сферы, так и при сравнении по ним вариантов РО. При этом длину радиус-вектора  $AB_i$  будем называть мерой энтропии  $S_i$  системы

конкретного варианта РО (в нашем случае энтропия – геометрическая мера оценки эффективности варианта РО,  $AB_i = S_i \in [0 \dots AB^{\max}]$ ). Чем меньше значение радиус-вектора  $AB_i$ , тем меньше энтропия  $S_i$  и тем ближе вариант РО к наилучшему (понятно, что, самый рациональный вариант РО находится в точке  $A$ , когда все три критерия равны нулю, что на сегодняшний день<sup>3</sup> видимо недостижимо).

Таким образом, ансамбль вариантов РО образует конечное множество вложенных друг в друга сфер (каждая со своим значением радиус-вектора  $AB_i$ , и, следовательно, со своей степенью энтропии  $S_i$ ). Чем меньше сфера – тем более эффективен вариант РО<sup>4</sup>.

Поэтому, задачу поиска, подлежащего для проектировщика, эффективного варианта РО, можно представить так:

$$S_i = AB_i \rightarrow 0, \text{ при } S_i \in [0 \dots 1], \quad (5)$$

или через уравнение, задающее сферу:

$$\sqrt{K_1^2 + K_2^2 + K_3^2} = AB_i = S_i \rightarrow 0, \quad (6)$$

Отсюда процесс поиска подлежащего варианта РО, есть процесс коллапса пространств (сфер) состояний РО (схлопывание сфер по направлению от наибольшей к наименьшей).

Другими словами, данный поиск есть процесс редукции всех возможных векторов состояний РО к удовлетворяющему проектировщика варианту<sup>5</sup>.

Отметим, что для дальнейшего раз-

<sup>1</sup> В дальнейшем штрих в обозначении этих параметров мы опустим.

<sup>2</sup> В тривиальном понимании этого термина, вопросы, имеющие отношение именно к управлению качеством, в настоящей работе не рассматриваются.

<sup>3</sup> Возможно, это не реализуемо в принципе в рамках нашей Вселенной.

<sup>4</sup> Естественно, что налицо и максимально не эффективная сфера, когда все три параметра равны единице (однако фактически такое РО сложно себе представить).

<sup>5</sup> В области исследования машин для земляных работ известно понятие «производственного потенциала», предложенное Недорезовым И.А. [14 и др.].

По нашему мнению, можно увидеть некоторую аналогию между введенной нами сущностью «энтропия единичного варианта РО» и указанным понятием. Однако мы сейчас, в отличии от Недорезова И.А., скорее говорим о «проектировочно-эксплуатационном потенциале единичного варианта РО» на конкретном этапе проектирования ОГЭ.

вития МВС при оценке вариантов РО не следует забывать о технологических возможностях конкретного производства.

Кроме того, в дальнейшем необходимо особое внимание обратить на человеческий фактор при моделировании процесса проектирования. Однако все эти вопросы – дело будущего, выходящие за границы настоящей работы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

В настоящем Приложении мы кратко укажем на ряд важных нюансов связанных с Методом Вложенных Сфер. Итак.

В момент его появления [8–11 и др.] он иллюстрировался нами на примере глобальных характеристик экскаваторов: их массе, коэффициенте полезного действия и производительности. Очевидно, что наборы показателей применяемых нами не зависят от сути метода, и могут быть выбраны из конкретных практических соображений. При этом число этих параметров может быть любым. Однако, отталкиваясь от особенностей человеческой психики, выбирать их более семи не стоит. Кроме того, при этом разговор будет идти, скорее не о сфере, а о симплексе.

Далее, для, например, случая трех локальных оценок качества РО, можно выписать следующее уравнение состояния сложной технической системы (СТС) – ОГЭ, и его подсистемы РО в частности:

$$S_i(K_1, K_2, K_3) = 0, \quad (P1)$$

Очевидно, что в более реалистичном виде это уравнение следует записать так:

---

По видимому, понятие предложенное Недорезовым И.А. так же может быть выписано на каждой стадии проектирования землеройной машины в каком то своем уникальном виде. Так же можно предположить, что все эти частные критерии могут быть сведены в конечном итоге в один – интегральный. Однако мы этой задачей сейчас заниматься не будем, т.к. она выходит за пределы нашей работы (к тому же нами интегральный параметр уже предложен).

$$S_i(K_1, K_2, K_3) \rightarrow MIN, \quad (P2)$$

Видно, что это уравнение описывает условие многокритериальной оптимизации РО в общем виде.

Понятно, что энтропия лучшего варианта РО не может уменьшаться, она уже минимальна. Напомним, что рост энтропии возможен лишь при ухудшении варианта РО, при нарастающем удалении его от оптимального варианта.

Таким образом: энтропия системы, в нашем случае, есть не что иное, как количество информации, не хватавшей для ее оптимального создания (полного описания) [15 и др.].

Вполне ясно, что при не стохастической аналитической модели синтеза варианта РО почти все отклонения вектора состояния от оптимального положения формируются за счет не оптимальности исходных данных.

Введем поэтому понятие количество информации  $H_i$ , позволяющее характеризовать указанное отклонение исходных данных. Будем определять параметр  $H_i$  по формуле:

$$H_i = -\sum_{j=1}^d \Delta_j, \quad (P3)$$

где  $j = 1, 2 \dots d$  – число исходных данных, образующих  $d$ -мерное фазовое пространство исходных данных;  $\Delta_j$  – сумма отклонений всех исходных данных от их оптимальных значений.

Анализируя формулу П3 видно, что при оптимальных исходных данных количество информации максимально и условно равно нулю. В противном случае количество информации, имеющееся у нас для рационального проектирования, уменьшается.

Нормирование и уточнение формулы для определения параметра  $\Delta_j$  в настоящей работе не выполняется. Однако ясно, что для конкретного исходного параметра СТС значение  $\Delta_j$  равно расстоянию между двумя точками, или говоря иначе – длине вектора между двумя точками.

Если же каждый набор исходных данных для одного варианта, например РО, представлять в виде d-мерного вектора в соответствующем пространстве, то в этом пространстве следует задать метрику, т.е. такую числовую функцию  $\rho = \rho(V_1, V_2)$ , которая каждой паре векторов рассматриваемого пространства сопоставляет неотрицательное число, называемое расстоянием между векторами  $V_1$  и  $V_2$  [16 и др.]. В данном случае это число и будет характеризовать понятие количества информации.

Понятно, что первый вектор в данном случае характеризует оптимальный вариант исходных данных, а второй – один из возможных вариантов.

Дополнительно отметим, что МВС, на наш взгляд, принципиально отлича-

ется от технологии многокритериального позиционирования [17]. О последней пишут: «...теоретического решения эта задача не имеет ... центр тяжести достоверности ... решений, полученных на основе многокритериального позиционирования, лежит в области интуитивной деятельности лица принимающего решение...» [17]. В нашем же случае теоретическое решение задачи на лицо.

Естественно, что для применения формулы ПЗ и всего после нее написанного необходимо иметь оптимальный вариант СТС. Поэтому для применения понятия количество информации в более широких пределах следует отыскать его иные формулировки (математические)<sup>6</sup>.

Дальнейшее продолжение исследований связанных с применением понятий энтропия и понятия количество информации в проектировании (и при моделировании процесса проектирования) должно отталкиваться от работ А.Н. Колмогорова и его учеников и последователей, трудов Д.С. Чернавского, некоторых положений работ Л. Бриллюэна и пр.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Побегайло П.А. О еще одной из возможных локальных оценок эффективности единичного варианта рабочего оборудования одноковшового гидравлического экскаватора / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. докладов X Международной научно-технической конференции. Чтения памяти В.Р. Кубачека. – Екатеринбург: УГГУ, 2012.
2. Побегайло П.А. О локальном критерии эффективности единичного варианта рабочего оборудования одноковшовых гидравлических экскаваторов при проектировании / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. докладов IX Международной научно-технической конференции. Чтения памяти В.Р. Кубачека. – Екатеринбург: УГГУ, 2011. – С. 121–126.
3. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критерии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 64 с.
4. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Наука, 1980. – 208 с.
5. Побегайло П.А. О проектировании рабочего оборудования одноковшовых гидравлических экскаваторов / Актуальные проблемы механики. X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Вторая Всероссийская школа молодых ученых механи-

<sup>6</sup> С другой стороны можно подойти к этому вопросу так. Из имеющихся вариантов РО выбрать один за условно оптимальный (для типовых конструктивных решений это не сложно, т.к. известны аналоги). Оценить в сравнении с ним иные варианты РО и т.д. Могут быть предложены и различные модификации данного подхода.

ков. Тезисы докладов. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2011. – С. 91.

6. Побегайло П.А. О проектировании рабочего оборудования одноковшовых гидравлических экскаваторов / II международная научно-практическая конференция «Техгормет-21 век»: Карьерная техника для открытых горных работ – новые разработки и эффективные решения: Материалы междунаучно-практической конференции. – СПб.: СПбГУ, 2011. – С. 37–39.

7. Владиславлев П.Н., Юдицкий С.А. Основы предпроектного анализа организационных систем. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 144 с.

8. Побегайло П.А. О новых подходах к оценке и сравнению вариантов сложных технических систем / Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2007». Секция Физика. Подсекция Математика и информатика. Сборник тезисов. – М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2007. – С. 70–71.

9. Побегайло П.А. Способ оценки и сравнения вариантов сложных технических систем / «Машиностроение и техносфера XXI века»: XIV международная научно-техническая конференция. Том 3. – Севастополь: ДонНТУ, 2007. – С. 182–183.

10. Побегайло П.А. Некоторые замечания о методологии проектирования сложных технических систем / «Машиностроение и

техносфера XXI века»: XIV международная научно-техническая конференция. Том 3. – Севастополь: ДонНТУ, 2007. – С. 183–186.

11. Побегайло П.А. О новых подходах к оценке и сравнению вариантов рабочего оборудования мощных гидравлических экскаваторов / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. докладов V Международной научно-технической конференции. Чтения памяти В.Р. Кубачека. – Екатеринбург: УГГУ, 2007. – С. 172–177.

12. Гутиря С.С., Карпов О.П., Яглінський В.П. Методологія підвищення технічного рівня промислових роботів і платформ / Луганськ: Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, № 6 (124), Ч. 1, 2008. – С. 109–116.

13. Пенроуз Р. Тени разума: в поиске науки о сознании. – Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 688 с.

14. Недорезов И.А. Производственный потенциал землеройных машин и пути его повышения / Машины для земляных работ. Труды ЦНИИСа. Вып. 79. – М.: Транспорт, 1973. – С. 7–13.

15. Блюменфельд Л.А. Решаемые и нерешаемые проблемы биологической физики. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 160 с.

16. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: ФИЗМАГЛИТ, 2005. – 176 с.

17. Захаров И.Г. Обоснование выбора. Теория практики. – СПб.: Судостроение, 2006. – 528 с. **ГЛАВА**

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Побегайло Петр Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: petrp214@yandex.ru, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН.

UDC 519.7(075.8)

## PRACTICAL APPLICATION OF THE METHOD OF THE EN-CLOSED SPHERES

Pobegailo P.A., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,  
e-mail: petrp214@yandex.ru,  
Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS.

In the real work it is a question of practical application of a method of the enclosed spheres at design of the working equipment of hydraulic excavators at early design stages. The essence of a method consists under the authority of uniform criterion of the quality including all local criteria (in this work the special case with three criteria is considered). This uniform criterion of quality is called by us entropy. The value of entropy there is less, the working equipment is more qualitative. On this basis process of search of suitable option of the working equipment, is process of collapse of spaces (spheres) of conditions of the working equipment (a collapse of spheres in the direction from the greatest to the smallest). In other words, search of the best

*option of the working equipment is process of a reduction of all possible vectors of conditions of the working equipment to option satisfying the designer.*

*Key words:* hydraulic excavator; working equipment; quality of the working equipment; method of the enclosed spheres.

## REFERENCES

1. Pobegailo P.A. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promyshlennosti: sb. dokladov X Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii. Chteniya pamyati V.R. Kubacheva* (Process equipment for mineral mining and petroleum industry: X International Conference Proceedings. Lectures in memoriam of V.R. Kubachev), Ekaterinburg, UGGU, 2012.
2. Pobegailo P.A. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promyshlennosti: sb. dokladov IX Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii. Chteniya pamyati V.R. Kubacheva* (Process equipment for mineral mining and petroleum industry: IX International Conference Proceedings. Lectures in memoriam of V.R. Kubachev), Ekaterinburg, UGGU, 2011, pp. 121–126.
3. Podinovskii V.V. *Vvedenie v teoriyu vazhnosti kriteriev* (Introduction to the theory of criteria criticality), Moscow, FIZMATLIT, 2007, 64 p.
4. Venttsel' E.S. *Issledovanie operatsii: zadachi, printsipy, metodologiya* (Analysis of operations: Objectives, principles, procedure), Moscow, Nauka, 1980, 208 p.
5. Pobegailo P.A. *Aktual'nye problemy mekhaniki. X Vserossiiskii s"ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki. Vtoraya Vserossiiskaya shkola molodykh uchenykh mekhanikov. Tezisy dokladov* (Actual problems in mechanics. X All-Russia Conference on Fundamental Problems of Basic and Applied Mechanics. Second All-Russia School of Young Mechanical Scientists. Proceedings), Nizhnii Novgorod: Izdatel'stvo Nizhegorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo, 2011, pp. 91.
6. Pobegailo P.A. *II mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Tekhgomet-21 vek»: Kar'ernaya tekhnika dlya otkrytykh gornykh rabot novye razrabotki i effektivnye resheniya: Materialy mezhdunarodno-prakticheskoi konferentsii* (II International Conference Tekhgomet-21st Century: Machinery for Open Pit Mining. Advanced Designs and Efficient Solutions), Saint-Petersburg, SPbGU, 2011, pp. 37–39.
7. Vladislavlev P.N., Yuditskii S.A. *Osnovy predproektного analiza organizatsionnykh sistem* (Basics of pre-project analysis of organizational systems), Moscow, Finansy i statistika, 2005, 144 p.
8. Pobegailo P.A. *Mezhdunarodnaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh po fundamental'nym naukam «Lomonosov-2007». Sektsiya Fizika. Podseksiya Matematika i informatika. Sbornik tezisov* (Lomonosov-2007 international forum of students, postgraduates and young scientists in fundamental sciences. Session: Physics. Subsession: Mathematics and Information Science. Proceedings), Moscow, MGU imeni M.V. Lomonosova, 2007, pp. 70–71.
9. Pobegailo P.A. *Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka: XIV mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya. T. 3* (Machine Engineering and Techno-Sphere in the 21st Century: XIV International Conference, vol. 3), Sevastopol', DonNTU, 2007, pp. 182–183.
10. Pobegailo P.A. *Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka: XIV mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya. T. 3* (Machine Engineering and Techno-Sphere in the 21st Century: XIV International Conference, vol. 3), Sevastopol', DonNTU, 2007, pp. 183–186.
11. Pobegailo P.A. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promyshlennosti: sb. dokladov V Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii. Chteniya pamyati V.R. Kubacheva* (Process equipment for mineral mining and petroleum industry: V International Conference Proceedings. Lectures in memoriam of V.R. Kubachev), Ekaterinburg, UGGU, 2007, pp. 172–177.
12. Гутиря С.С., Карпов О.П., Ягільський В.П. Методологія підвищення технічного рівня промислових роботів і платформ. *Луганськ: Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, по 6 (124), part 1, 2008, pp. 109–116.
13. Penrouz R. *Teni razuma: v poiske nauki o soznaniu* (Brain shadows: In search of science on consciousness), Moscow–Izhevsk: Institut kompyuternykh issledovanii, 2005, 688 p.
14. Nedorezov I.A. *Mashiny dlya zemlyanykh rabot. Trudy TsNII Sa. Vyp. 79* (Earth-moving machines. CNIIS Transactions, issue 79), Moscow, Transport, 1973, pp. 7–13.
15. Blyumenfel'd L.A. *Reshaemye i ne reshaemye problemy biologicheskoi fiziki* (Solvable and unsolvable problems of biological physics), Moscow, Editorial URSS, 2002, 160 p.
16. Nogin V.D. *Prinyatie reshenii v mnogokriterial'noi srede: kolichestvennyi podkhod* (Multicriteria decision-making: Quantitative approach), Moscow, FIZMATLIT, 2005, 176 p.
17. Zakharov I.G. *Obosnovanie vybora. Teoriya praktiki* (Substantiation of choice. Theory and practice), Saint-Petersburg, Sudostroenie, 2006, 528 p.