

**От редакции.** В настоящей разовой рубрике публикуются статьи молодых ученых, преподавателей и студентов, рекомендованные к печати руководством Научно-образовательного центра «ТГТУ – Институт системного анализа РАН “Распределенные вычисления и компьютерные сети”» и подготовленные при проведении в ТГТУ на кафедре «Автоматизированное проектирование технологического оборудования» краткосрочных поисковых НИР (научных стажировок). Работы выполнены в рамках государственного контракта № 14.В37.21.0234 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по теме «Разработка информационных систем поддержки принятия решений при проектировании и управлении техническими объектами химического и машиностроительного профиля с использованием технологии виртуального моделирования».

**Editorial.** This one-time rubric includes articles of young scientists, lecturers and students recommended for publication by Scientific – Educational Center of TSTU – System Analysis Institute of RAS ‘Distributed Computing and Computer Networks’ and prepared in the course of short-term research fellowships conducted by TSTU Department ‘Automated Design of Process Equipment’. The research has been done under the state contract number 14.B37.21.0234 Federal Program ‘Researchers and educators of innovative Russia’ in 2009–2013 on ‘The development of information systems to support decision-making in design and management of technical objects of chemical and mechanical engineering technology with virtual simulation’.

УДК 66.01.011

### ВЫБОР ОСНОВНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

С.В. Карпушкин<sup>1</sup>, В.И. Зацепина<sup>2</sup>, Е.П. Зацепин<sup>2</sup>

*Кафедры: «Автоматизированное проектирование технологического оборудования», ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (1); karp@mail.gaps.tstu.ru;  
«Электрооборудование», ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк (2)*

*Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гапановой*

**Ключевые слова и фразы:** выбор основной аппаратуры; многоассортиментные химические производства; определение аппаратурного оформления; технологические системы.

**Аннотация:** Рассмотрена методика выбора основного оборудования технологических систем многоассортиментных химических производств, для которых характерна быстрая сменяемость номенклатуры и объемов выпуска продуктов.

Общая задача выбора основной аппаратуры представлена в виде двухуровневой иерархии задач. Приведены обобщенные постановки задач верхнего и нижнего уровней иерархии, перечислены необходимые исходные данные и источники их получения, предложена методика совместного решения задач.

Отличительными признаками многоассортиментных химических производств (МХП) являются обширная номенклатура продукции, небольшие (до 1000 т/год) производительности по отдельным ее маркам, постоянные изменения их ассортимента и объемов выпуска. К классу МХП относятся производства синтетических красителей и полупродуктов, фармацевтических препаратов, химических реактивов. Основной структурной единицей МХП является технологическая система (ТС) – аппаратурно-технологический комплекс, ориентированный на выпуск нескольких марок продукции определенного вида. Большинство ТС МХП осуществляют последовательный выпуск продуктов и работают в периодическом режиме (продукты выпускаются отдельными партиями, последовательно проходящими все стадии переработки).

Одним из основных этапов технологических расчетов, выполняемых при проектировании МХП, является выбор основной аппаратуры (ОА) ТС: необходимо выбрать определяющие геометрические размеры (объемы, поверхности) и число аппаратов стадий системы, характеристики режима ее функционирования, обеспечивающие выпуск продуктов заданного ассортимента  $I$  в требуемых объемах  $Q_i$ ,  $i = \overline{1, I}$  за планируемый период  $T_p$  [1, 2]. Предлагаемый подход к решению этой проблемы предусматривает представление общей задачи в виде двухуровневой иерархии задач: на верхнем уровне решается задача определения характеристик режима функционирования ТС и оборудования ее стадий (задача  $RF$ ), на нижнем – задачи определения размеров (из числа стандартных) и числа аппаратов стадий ТС, способов переработки партий продуктов выбранными аппаратами (задач  $OA_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ , где  $J$  – число аппаратурных стадий ТС). Задача  $RF$  формулируется как задача нелинейного программирования, а задачи  $OA_j$  – как задачи дискретной оптимизации. Такой подход позволяет избежать затруднения, многократно упоминаемого в научных публикациях по рассматриваемой проблеме [3–5], – необходимости решать задачу смешанного дискретно-нелинейного программирования, эффективные методы решения которой до настоящего времени не предложены. Необходимо отметить, что предлагаемые формулировки задач учитывают возможность изменения размеров партий продуктов в ходе их переработки на стадиях ТС. Эти операции широко применяются в ТС МХП для обеспечения требуемых условий реализации стадий синтеза различных продуктов в одних и тех же аппаратах.

Задача  $RF$  формулируется как

$$Ze(W^*) = \min_{W, TOS, TOF} \{Ze(W) | f_{\omega}(W, TOS, TOF) \geq 0, \omega \in \Omega r\},$$

где  $Ze$  – стоимость энергоресурсов, необходимых для выпуска всех продуктов в объемах  $Q_i$ ,  $i = \overline{1, I}$  за период  $T_p$ ,  $W = (w_1, \dots, w_I)$  – совокупность значений размеров партий продуктов,  $TOS = \{tos_{ijl} | i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, l = \overline{1, L_{ij}}\}$ ,  $TOF = \{tof_{ijl} | i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, l = \overline{1, L_{ij}}\}$  – множества значений моментов начала и

окончания всех операций  $l \in (1, \dots, L_{ij})$  циклов работы аппаратов стадий ТС при выпуске всех продуктов. Ограничения  $f_{\omega}(W, TOS, TOF) \geq 0, \omega \in \Omega_r$  математической модели функционирования ТС МХП включают условие  $\sum_{i=1}^I T_i(w_i) \leq T_p$  (сумма длительностей выпуска продуктов не должна превышать значения  $T_p$ ), ограничения  $0 < w_i \leq Q_i, i = \overline{1, I}$  на изменение значений размеров партий продуктов и условия синхронизации циклов работы аппаратов соседних стадий ТС [6].

К числу исходных данных для решения задачи  $RF$ , кроме числа  $I$ , наименования продуктов, выпускаемых ТС, срока  $T_p$  их выпуска в планируемых объемах  $Q_i, i = \overline{1, I}$ , числа  $J$  аппаратных стадий ТС и структуры связей между ними при выпуске каждого продукта, относятся материальные индексы стадий по продуктам, значения длительностей переработки партий продуктов на стадиях, где основными аппаратами являются емкости с перемешивающими устройствами, и удельных производительностей основных аппаратов стадий фильтрации и сушки. Для оценки эффективности выбранного режима функционирования ТС и оборудования ее стадий необходимо определить (по данным регламентов выпуска продуктов с помощью системы автоматизированного расчета химического оборудования [7]) удельные расходы основных видов энергоресурсов (электроэнергия, тепло, холод), Вт/кг, потребляемых оборудованием стадий ТС при реализации отдельных операций переработки партий продуктов, а также материальные индексы и длительности операций. Кроме того, для определения характеристик режима функционирования ТС и оборудования ее стадий необходимы некоторые результаты выбора ОА стадий ТС (решения задач  $OA_j$ ):

- число  $n_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ , основных аппаратов стадий ТС, используемых при выпуске каждого продукта;

- указатели  $p_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ , способа обработки партий продуктов параллельными основными аппаратами стадий ТС (целиком либо равными долями синхронно);

- указатели  $r_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ , изменения размеров партий продуктов на стадиях ТС (без изменений, разделение на равные доли для последовательной переработки, либо объединение нескольких партий для одновременной переработки).

Значения размеров партий продуктов  $w_i, i = \overline{1, I}$ , и соответствующие им значения моментов начала  $tos_{ijl}$  и окончания  $tof_{ijl}$  операций  $l$  циклов работы основных аппаратов каждой стадии  $j$  выпуска каждого продукта  $i$ , полученные в результате решения задачи  $RF$ , должны обеспечивать выпуск всех продуктов в объемах  $Q_i, i = \overline{1, I}$ , за период времени  $T_p$  при минимальных затратах энергоресурсов.

Задача  $OA_j$  сводится к выбору определяющих геометрических размеров  $X_j$  и числа  $N_j$  основных аппаратов стадии  $j$  ТС, обеспечивающих минимум капитальных затрат на ее технологическое оборудование. Задача  $OA_j$  формулируется как

$$Zk_j(N_j^*, X_j^*) = \min_{N_j, X_j} \{Zk_j(N_j, X_j) | f_{\omega}(N_j, X_j) \geq 0, \omega \in \Omega_{a_j}\},$$

где  $Zk_j$  – амортизационные отчисления от стоимости основных аппаратов стадии  $j$  ТС за период  $T_p$ . Ограничения  $f_{\omega}(N_j, X_j) \geq 0, \omega \in \Omega_{a_j}$ , математических моделей выбора ОА стадий ТС включают условия выбора определяющих геометрических

размеров основных аппаратов различных типов, условия принадлежности выбираемых значений  $X_j$  множествам размеров серийно выпускаемых аппаратов, соотношения для определения значений  $N_j$  и условия их целочисленности.

Заметим, что в ходе решения задач  $OA_j$  (в результате обеспечения выполнения ограничений  $f_{\omega}(N_j, X_j) \geq 0$ ) могут быть изменены значения указателей  $r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ , способа переработки партий продуктов на стадиях ТС и числа  $n_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ , основных аппаратов, используемых при выпуске каждого продукта. Следовательно, процесс совместного решения задачи  $RF$  и задач  $OA_j, j = \overline{1, J}$ , должен предусматривать предварительный прогноз значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ , и их итерационное уточнение. Определяющим для успешной реализации этого процесса является выбор начальных значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ : с одной стороны, они должны, по возможности, обеспечивать существование допустимых решений задач; с другой – соответствующие значения критериев оптимальности должны быть близки к минимальным. Нами разработаны необходимые условия существования решений задач выбора ОА ТС МХП, проверка и обеспечение выполнения которых позволяет давать обоснованный прогноз значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$  [2].

На основании вышесказанного предлагается следующая общая схема процесса совместного решения задачи  $RF$  и задач  $OA_j, j = \overline{1, J}$ :

1) прогноз значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ , на основании результатов проверки и обеспечения выполнения условий существования решений задач;

2) решение задачи  $RF$ , то есть определение значений размеров партий продуктов  $w_i, i = \overline{1, I}$ , и соответствующих значений моментов  $tos_{ijl}, tof_{ijl}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, l = \overline{1, L_{ij}}$ , начала и окончания операций циклов работы основных аппаратов каждой стадии выпуска каждого продукта, обеспечивающих минимум функции  $Ze(W)$ ;

3) решение задач  $OA_j$  для всех аппаратурных стадий ТС, то есть выбор числа и определяющих геометрических размеров основных аппаратов стадий  $N_j, X_j, j = \overline{1, J}$ , обеспечивающих минимум функций  $Zk_j(N_j, X_j, NV_j, XV_j)$ ;

4) возврат на п. 1, если полученные в п. 3 значения  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ , не совпадают с их прогнозом.

Алгоритм решения задачи  $RF$  разработан на основе классического метода условной оптимизации – метода прямого поиска с возвратом. Алгоритмы решения задач  $OA_j, j = \overline{1, J}$ , предусматривают: выбор минимально допустимых размеров основных и вспомогательных аппаратов каждой стадии ТС; коррекцию значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in \overline{1, J}$ , в случаях, когда ни один стандартный размер не удовлетворяет всем ограничениям; определение числа основных аппаратов.

Расчеты, выполненные для реальных производств химических красителей (более 30-ти ТС), показали высокую эффективность предлагаемой методики выбора ОА ТС МХП. При сравнительно небольших затратах времени на получение решений комплекса задач  $RF$  и  $OA_j, j = \overline{1, J}$  (1–5 мин на ПК Intel(R) Core(TM)2

Quad CPU Q6600@2.4 GHz, 8GB RAM) их качество заслужило высокую оценку экспертов (работников технологических групп проектных организаций и проектно-конструкторских отделов предприятий).

*Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.В37.21.0234 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.*

#### *Список литературы*

1. Малыгин, Е.Н. Методика определения аппаратурного оформления многопродуктовых химико-технологических систем / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, А.Б. Борисенко // Хим. пром-сть сегодня. – 2003. – № 5. – С. 43–50.
2. Карпушкин, С.В. Выбор аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств : монография / С.В. Карпушкин. – М. : Машиностроение-1, 2006. – 140 с.
3. Декомпозиционный алгоритм оптимизации многопродуктовых химико-технологических систем / Л.С. Гордеев [и др.] // Програм. продукты и системы. – 1997. – № 1. – С. 2–10.
4. Pinto, T. Decomposition Based Algorithm for the Design and Scheduling of Multipurpose Batch Plants / T. Pinto, A. Barbósa-Póvoa, A. Novais // 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering / edited by Wolfgang Marquardt, Costas Pantelides. – Amsterdam, 2006. – P. 1051–1056. – (Computer Aided Chemical Engineering ; Vol. 21, Part A).
5. Mokeddem, D. Optimal Solutions of Multiproduct Batch Chemical Process Using Multiobjective Genetic Algorithm with Expert Decision System / D. Mokeddem, A. Khellaf // Journal of Automated Methods and Management in Chemistry. – 2009. – Vol. 2009. – Art. ID 927426. – 9 pages. – doi:10.1155/2009/927426.
6. Малыгин, Е.Н. Математическая модель функционирования многопродуктовых химико-технологических систем / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, А.Б. Борисенко // Теорет. основы хим. технологии. – 2005. – Т. 39, № 4. – С. 455–465.
7. Система автоматизированного расчета и конструирования химического оборудования / Е.Н. Малыгин [и др.] // Информ. технологии. – 2000. – № 12. – С. 19–21.

---

## **Selecting Main Instruments to Enhance Process Systems of Multi-Assortment Chemical Plants**

**S.V. Karpushkin<sup>1</sup>, V.I. Zatsepina<sup>2</sup>, E.P. Zatsepin<sup>2</sup>**

*Departments: “Computer-Aided Design of Process Equipment”, TSTU; karp@mail.gaps.tstu.ru (1); “Electrical Equipment”, Lipetsk State Technical University, Lipetsk (2)*

**Key words and phrases:** multi-assortment chemical production; process systems; selecting hardware design; selecting main instruments.

**Abstract:** This paper is dedicated to selecting the main instruments of technological systems of multi-assortment chemical plants, which have a rapid turnover of the range and volumes of products. The overall objective of selecting main

instruments is presented in the form of a two-level hierarchy of tasks. The tasks of the upper and lower levels of the hierarchy have been set in the generalized form; the required input data and their sources have been listed; the method collaborative problem solving has been proposed.

---

### **Auswahl der Hauptapparatur für die Ausrüstung der technologischen Systeme der vielsortimenten technologischen Produktionen**

**Zusammenfassung:** Der Artikel ist der Methodik der Auswahl der Hauptausrüstung der technologischen Systeme der vielsortimenten technologischen Produktionen, für die die schnelle Absetzbarkeit der Nomenklatur und der Produktionsumfänge charakteristisch ist, gewidmet. Die Gesamtaufgabe der Hauptapparatur ist in der Zweiebenenhierarchie der Aufgaben vorgelegt. Es sind die zusammengefassten Stellungen der Aufgaben der Ober- und Unterebenen der Hierarchie angeführt, es sind die notwendigen Ausgangsangaben und die Quellen ihrer Erhaltung aufgezählt, es ist die Methodik der gemeinsamen Aufgabenlösung vorgeschlagen.

---

### **Choix de l'appareillage essentiel pour l'équipement des systèmes technologiques à multiassortiment pour les industries chimiques**

**Résumé:** L'article est consacré à la méthode du choix de l'appareillage essentiel pour l'équipement des systèmes technologiques à multiassortiment pour les industries chimiques pour lesquelles le changement rapide de la nomenclature et des volumes de la production est typique. La tâche générale du choix de l'appareillage essentiel est présentée en vue de l'hierarchie de problèmes à deux niveaux. Sont citées les mises générales des problèmes pour les niveaux supérieur et inférieur de l'hierarchie, sont mentionnées les données initiales nécessaires et leurs sources, est proposée la méthode pour la solution commune des tâches.

---

**Авторы:** *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированное проектирование технологического оборудования», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Зацепина Виолетта Иосифовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование»; *Зацепин Евгений Петрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование», ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк.

**Рецензент:** *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---