

## ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,  
karp@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** автоматизированное проектирование; многоассортиментное химическое производство; принципы декомпозиции, моделирования, оптимальности и проектируемости; технологическое оборудование.

**Аннотация:** Представлены принципы, которыми рекомендовано руководствоваться при автоматизированном проектировании технологического оборудования многоассортиментных химических производств: декомпозиции общей задачи проектирования на ряд взаимосвязанных подзадач, моделирования проектных решений с ориентацией на формирования полей определяемых параметров, оптимальности проектных решений и проектируемости. Принципы проиллюстрированы на примере задачи определения аппаратурного оформления химико-технологической системы проектируемого многоассортиментного химического производства.

---

### Введение

Автоматизированное проектирование технических систем включает комплекс задач, постановка и решение которых основаны на использовании методов системного анализа, математического моделирования, оптимизации, обработки информации.

Особенности многоассортиментных химических производств (МХП), такие как широкий ассортимент выпускаемой продукции при небольших (менее 1000 т/год) объемах выпуска продуктов и частых изменениях ассортимента, существенно усложняют процесс их проектирования. Примерами МХП могут служить производства синтетических красителей и полупродуктов, фармацевтических препаратов, химических реактивов. Химико-технологические системы (ХТС) МХП, как правило, ориентированы на выпуск нескольких марок продукции, сходных по технологии синтеза, причем в каждый момент времени осуществляется выпуск единственного продукта. Химико-технологические системы МХП работают в периодическом режиме, то есть продукты выпускаются отдельными партиями, которые последовательно проходят все этапы переработки, предусмотренные технологическими регламентами. Стадии ХТС представляют собой совокупности основных и вспомогательных аппаратов, предназначенных для реализации этапов переработки партий продуктов.

На основе многолетнего опыта работы с проектными организациями и проектно-конструкторскими подразделениями промышленных предприятий, участия в проектировании десятков промышленных технических систем химико-техно-

гического профиля предлагаются принципы автоматизированного проектирования технологического оборудования МХП, которые могут служить руководством для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в данной области.

### Принцип декомпозиции общей задачи проектирования

Детальная формулировка общей задачи проектирования оборудования МХП, как правило, бессмысленна, так как высокая размерность и сложная система разнородных ограничений делают ее решение невозможным. Общую задачу следует представлять в виде системы взаимосвязанных локальных задач и предусматривать реализацию итерационной процедуры их совместного решения с необходимой коррекцией исходных данных для следующей итерации по результатам выполнения предыдущей [1].

Среди локальных задач выделим определение числа ХТС и ассортимента их продукции, выбор аппаратного оформления (АО) стадий каждой ХТС, размещение технологического оборудования всех ХТС в производственном помещении, разработку календарного плана выпуска продукции, методика решения каждой из которых также предусматривает декомпозицию на локальные подзадачи.

В качестве примера рассмотрим задачу определения АО одной из ХТС проектируемого МХП. Исходными данными для ее решения являются наименования продуктов и объемы выпуска каждого из них (месячные, квартальные или годовые), технологические регламенты синтеза продуктов. Результат решения: число и типоразмеры основных аппаратов каждой стадии, параметры режима функционирования оборудования каждой стадии и системы в целом, обеспечивающие требуемую производительность по каждому продукту при минимальных затратах на оборудование и энергообеспечение. Эта задача относится к классу задач смешанного дискретно-нелинейного программирования (*англ.* Mixed Integer-Nonlinear Programming), общепринятая методика решения которых до настоящего времени не разработана.

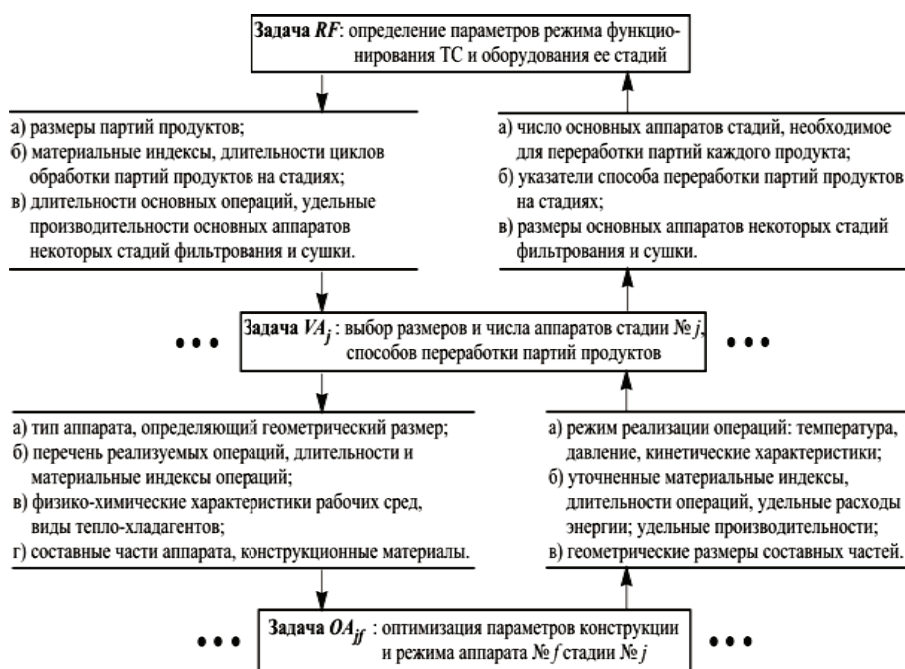
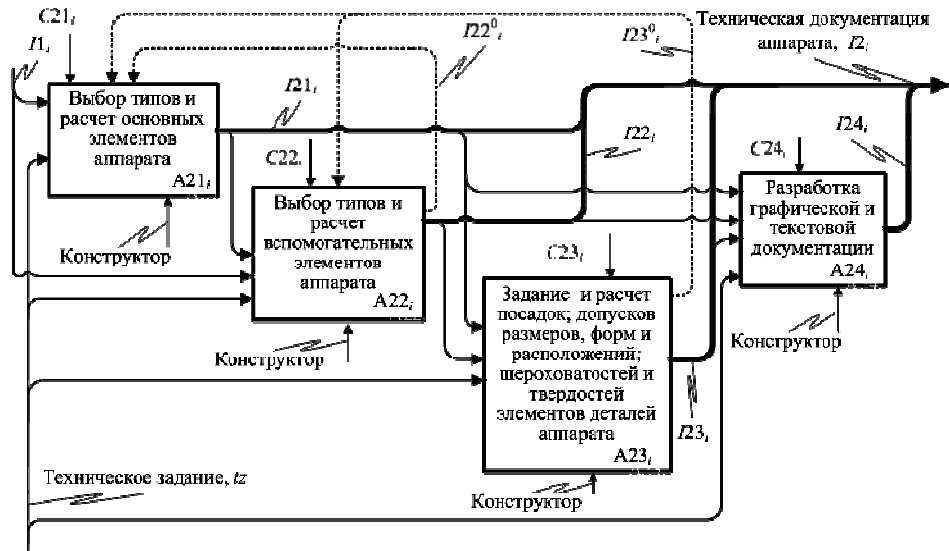


Рис. 1. Иерархия задач АО ТС МХП и информационные связи между ними

Предлагаемая стратегия декомпозиции задачи определения аппаратного оформления ТС МХП, в отличие от рассмотренных ранее [2 – 4], базируется на принципе разделения параметров задачи по характеру их изменения: отделения параметров режима функционирования ХТС, изменяющихся непрерывно, от дискретных характеристик оборудования ее стадий. С учетом определяющего влияния параметров режима функционирования ХТС на АО стадий системы в качестве задачи верхнего уровня иерархии выбрана задача *RF* оптимизации параметров режима функционирования ХТС при выпуске в течение планового периода *T<sub>p</sub>* всех продуктов заданного ассортимента *I* в требуемых объемах *Q<sub>i</sub>*, *i* = 1, ..., *I*. На среднем уровне решаются задачи *VA<sub>j</sub>*, *j* = 1, ..., *J*, выбора определяющих размеров и числа основных аппаратов каждой из *J* ее стадий, а также способов переработки партий продуктов основными аппаратами каждой стадии системы. На нижнем уровне – задачи *OA<sub>jf</sub>* оптимизации параметров конструкции и режима функционирования *f*-го аппарата стадии *j* (рис. 1).

В свою очередь, задачи *OA<sub>jf</sub>*, *j* = 1, ..., *J*, *f* = 1, ..., *F<sub>j</sub>*, для каждого из *F<sub>j</sub>* аппаратов стадии *j* также могут быть декомпозированы на основе разбиения всех его элементов на основные, формирующие рабочую зону, и вспомогательные, непосредственно не влияющие на рабочую зону, но необходимые для нормального функционирования [5]. Соответственно, сначала осуществляется поиск параметров основных элементов, на основании результатов которого определяются параметры вспомогательных элементов (рис. 2).

Прежде чем находить параметры основных элементов, необходимо определить их типы. При расчете основных технологических и конструктивных параметров некоторые конструктивные параметры приходится задавать, так как их



**Рис. 2. Функциональная диаграмма разработки аппарата стадии ХТС:**

*tz* – техническое задание на разработку аппарата; *П1*, *I2* – соответственно основные и вспомогательные элементы аппарата и их размеры; *C21*, *C22*, *C23*, *C24* – нормативные документы, методики расчетов; *I21*, *I22* – типы вспомогательных элементов и их основные размеры соответственно; *I23* – унитарные (зависящие от основных) размеры вспомогательных элементов аппарата; *I24* – графическая и текстовая документация на элементы аппарата; *I22<sup>0</sup>* – перечень и размеры вспомогательных элементов, выбор которых может повлиять на результаты поиска параметров основных элементов; *I23<sup>0</sup>* – перечень значений формы и расположения, выбор которых может повлиять на результаты выбора основных или вспомогательных элементов

значения не могут быть найдены на данном уровне. Например, толщина стенки корпуса емкостного аппарата, которая влияет на тепловые процессы, протекающие в рабочей зоне аппарата, относится к вспомогательным параметрам и определяется на уровне АЗ.

Вспомогательные элементы, как правило, являются стандартными или типовыми. Задачи их выбора часто сводятся к разрешению условий вида «ЕСЛИ ..., ТО...». В нормативных документах вспомогательные элементы представлены таблицами типоразмеров. При известном типе элемента его выбор осуществляется по одному или нескольким параметрам, однозначно определяющим значения всех остальных. Например, параметры фланцевого соединения (число и диаметр отверстий под болты, толщина тарелки, размеры уплотнительной поверхности и др.) определяются по внутреннему диаметру тарелки фланца.

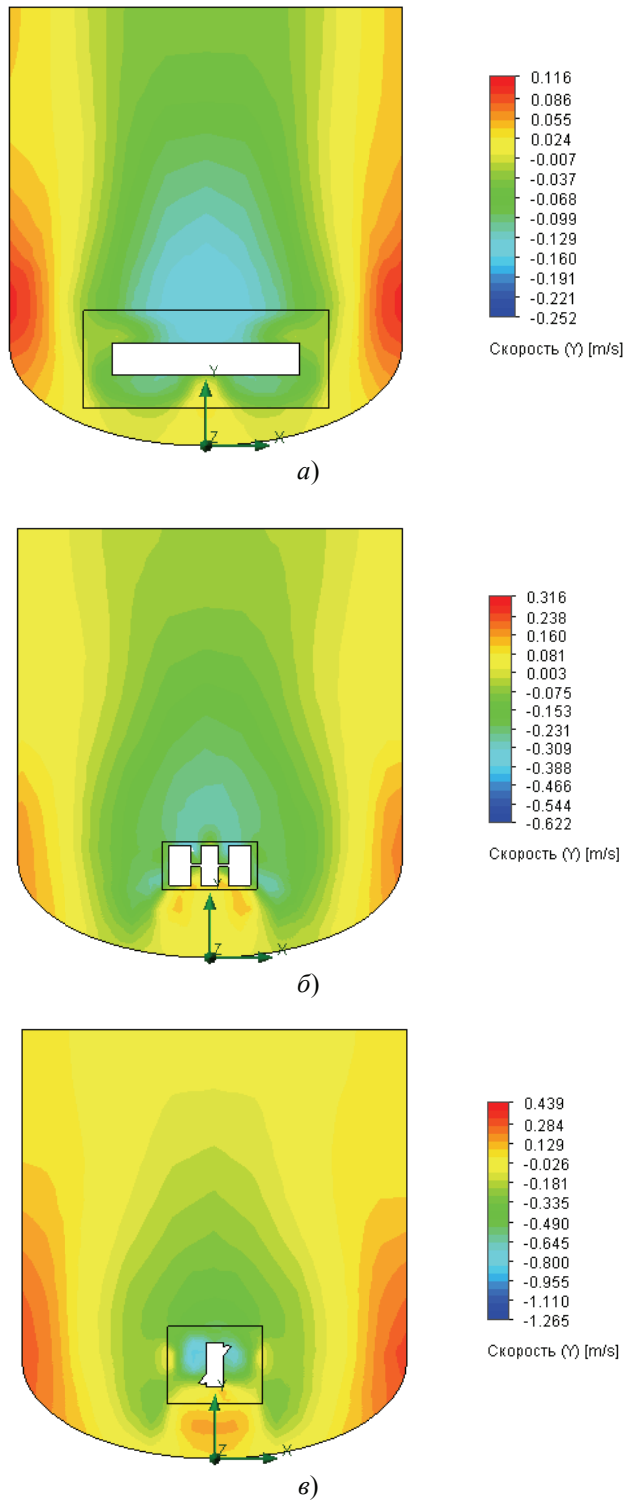
### Принцип моделирования проектных решений

Вид соотношений и область определения математической модели проектного решения прямо следуют из постановки задачи проектирования. Математическая модель проектного решения может включать математические модели процессов, реализуемых в объекте проектирования, если они разработаны и уровень их детализации достаточен для целей проектирования.

Желательно, чтобы математические модели процессов, реализуемых в объекте проектирования, были ориентированы на формирование полей определяемых параметров: концентраций, температур, скоростей потоков, нагрузок, деформаций и т.д. Процесс принятия проектных решений с применением таких математических моделей сводится к подбору сочетаний параметров конструкции и режима функционирования исследуемого объекта, обеспечивающих оптимальные значения параметров объекта.

Например, при решении задачи оптимизации параметров конструкции и режима функционирования механического перемешивающего устройства вертикального емкостного аппарата (одной из задач  $OA_{jf}$ ) для математического описания процесса механического перемешивания использованы осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса в цилиндрической системе координат при допущении о симметричности поля скоростей перемешиваемой среды относительно оси вращения мешалки, то есть постоянства осредненного значения составляющей вектора скорости  $\bar{u}_\varphi$  ( $\varphi$  – полярный угол) во всем объеме аппарата (обусловлено ослаблением тангенциальных потоков жидкости при установившемся режиме перемешивания за счет существенного усиления радиальных и аксиальных потоков) [6]. Поэтому моделируется определение осредненных значений составляющих вектора скорости  $\bar{u}_l$  и  $\bar{u}_r$  (по высоте  $l$  и радиусу  $r$  аппарата), соответствующих комбинации фиксированных значений частоты вращения вала мешалки  $n$ , ее диаметра  $D_m$ , высоты лопасти  $H_m$  и высоты расположения над днищем аппарата  $h_{hm}$  для установившегося (квазистационарного) течения гомогенной жидкости в аппарате при постоянной температуре.

Для компьютерного моделирования процесса перемешивания жидкости в вертикальном емкостном аппарате механической мешалкой использована программа Open FOAM [7], ввиду того, что ее кросс-компилированная версия Blue CFD, предназначенная для работы под управлением операционных систем Windows, является свободно распространяемым инструментарием вычислительной гидродинамики для операций с полями. На рисунке 3 представлены изображения полей скоростей, полученные при оптимальных значениях  $n$ ,  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$  для различных типов мешалок, устанавливаемых в лабораторном аппарате.



**Рис. 3. Поля скоростей перемешиваемой жидкости в вертикальном емкостном аппарате при оптимальных значениях параметров мешалок: а – двухлопастной; б – турбинной открытой; в – трехлопастной**

С применением такого подхода к моделированию процесса механического перемешивания проведены работы по расчету и подбору эффективного перемешивающего устройства с якорной мешалкой для промышленного аппарата, входящего в ХТС производства фталоцианина меди в цехе №15 АО «Пигмент» (Тамбов).

В ходе расчетов выявлено, что оптимальная с точки зрения степени равномерности поля скоростей высота установки мешалки  $h_{hm} = 0,05D_m$ , оптимальная высота лопасти мешалки  $H_m = 0,85D_m$  при рекомендации нормативного документа НИИХИММАШ [8]  $H_m = 0,7D_m$ , диаметр мешалки  $D_m = 0,95D_r$  ( $D_r$  – внутренний диаметр аппарата) при рекомендации [8]  $D_m = (0,7 \dots 0,9)D_r$ . Ширину лопасти мешалки потребовалось увеличить до значений  $L_m = 0,15D_m$  при рекомендации [8]  $L_m = 0,07D_m$ .

После проведения пусконаладочных работ и опытной эксплуатации была подтверждена эффективность предложенной компоновки, которая позволила сократить продолжительность стадии с 20 до 18 ч (увеличение мощности производства с 1188 до 1320 т/год). Помимо этого, потребляемая при перемешивании мощность привода мешалки уменьшилась на 16 %.

Отсутствие математических моделей реализуемых процессов не является препятствием для разработки математической модели проектного решения: используется информация из технического задания на проектирование, регламентов выпуска продуктов и нормативных документов (ГОСТ, РД, РТМ).

### Принцип оптимальности проектных решений

Задачи проектирования следует формулировать как задачи математического программирования или вариационные, то есть обосновывать выбор критерия (критериев) оптимальности проектных решений и области поиска значений параметров конструкций и режимов функционирования элементов технической системы на всех этапах ее проектирования.

В качестве критерия оптимальности решения задачи  $RF$ , то есть режима функционирования ТС, определяемого значениями размеров партий продуктов  $w_i$ ,  $i = 1, \dots, I$ , моментов начала и окончания  $l$ -й операции  $k$ -го цикла работы аппаратов стадии  $j$  ХТС при выпуске  $i$ -го продукта  $tos_{ijkl}, tof_{ijkl}$ ,  $i = 1, \dots, I$ ,  $j \in J_i$ ,  $k = 1, \dots, K_{ij}$ ,  $l = 1, \dots, L_{ijk}$ , предложено использовать нижнюю оценку стоимости энергоресурсов различных видов (электричество, тепло, холод), потребляемых при реализации операций переработки партий продуктов в течение периода эксплуатации  $T_p$  [9]:

$$Ze = \sum_{i=1}^I w c_i \sum_{j \in J_i} \frac{w_i p n_{ij}}{r_{ij}} \sum_{k=1}^{K_{ij}} \sum_{l=1}^{L_{ijk}} \sum_{ke=1}^{K_e} C^{ke} e n_{ijl}^{ke} g o c_{ijkl} (to f_{ijkl} - to s_{ijkl}), \quad (1)$$

где  $C^{ke}$  – стоимость единицы (1 Дж) энергоресурса вида  $ke$ ;  
 $p n_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_{ij} = 0 \\ 1,05 n_{ij}, & \text{если } p_{ij} = 1 \end{cases}$  – коэффициент увеличения затрат энергии на  $j$ -й стадии

ТС при синхронной обработке равных долей партии  $i$ -го продукта в нескольких параллельных аппаратах (за счет увеличения потерь),  $p_{ij}$  – указатель способа обработки партий  $i$ -го продукта аппаратами стадии  $j$  ХТС ( $p_{ij} = 1$  – синхронная обработка  $1/n_j$  доли партии в каждом аппарате,  $p_{ij} = 0$  – обработка партий целиком в порядке поступления);  $r_{ij}$  – коэффициент изменения размера партии  $i$ -го продук-

та на стадии  $j$  ХТС;  $goc_{ijkl}$  – материальный индекс  $l$ -й операции  $k$ -го цикла работы аппаратов стадии  $j$  ТС при выпуске  $i$ -го продукта, кг/т;  $en_{ijl}^{ke}$  – удельный расход, Вт/кг, энергоресурса вида  $ke$  при реализации этой операции.

В качестве критерия оптимальности решения каждой из задач  $AO_{sj}$  предложено использовать ориентировочную стоимость выбранных основных аппаратов конкретной стадии. Стадии ХТС МХП, как правило, комплектуются стандартными аппаратами, стоимость которых можно определить по прейскурантам цен на оборудование, выпускаемое предприятиями химического машиностроения. Для приблизительной оценки стоимости оборудования предлагается использовать функциональные зависимости цены аппарата от его типа ( $ta_j$ ) и определяющего размера

$$s(ta_j, X_j) = \alpha_j X_j^{\beta_j}, \quad j = 1, \dots, J,$$

где  $\alpha_j = \alpha_j(ta_j)$ ,  $\beta_j = \beta_j(ta_j)$  – коэффициенты, определяемые методами регрессионного анализа на основе имеющейся информации о ценах на аппараты различных типов, например, для стальных эмалированных емкостных аппаратов с цилиндрическими рубашками, сальниковыми уплотнениями и механическими перемешивающими устройствами, включая мотор-редукторы,  $s(ta_j, X_j) = 94,643X_j^{0,368}$ . С применением подобных зависимостей капитальные затраты на основное технологическое оборудование стадии  $j$  ХТС МХП можно оценить по формуле

$$Z_j = N_j s(ta_j, X_j),$$

а для обеспечения совместимости критериев оптимальности решений задач  $VA_j$  и задачи  $RF$  в качестве целевой функции задачи выбора АО стадии  $j$  ХТС используется сумма амортизационных отчислений от стоимости оборудования стадии за период выпуска продуктов в плановых объемах

$$Zk_j = Ek (Tp/Ty) (N_j s(ta_j, X_j)), \quad (2)$$

где  $Ek$  – нормативный коэффициент окупаемости для оборудования (0,15);  $Ty$  – годовой эффективный фонд рабочего времени ХТС, ч, с учетом сменности ее работы и продолжительностей переходов с выпуска одних продуктов на другие согласно календарному плану.

В качестве критерия оптимальности решения одной из задач  $OA_{jf}$ : оптимизации параметров конструкции и режима функционирования механического перемешивающего устройства вертикального емкостного аппарата предлагается использовать минимум дисперсии суммарной длины вектора скорости перемешиваемой среды, характеризующей степень равномерности поля скоростей в объеме аппарата:

$$K_{SVS} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z (\bar{u}_i - \bar{u}_{cp})^2, \quad (3)$$

где  $\bar{u}_i = \sqrt{\bar{u}_{li}^2 + \bar{u}_{ri}^2}$  – суммарная длина вектора скорости, м/с;  $\bar{u}_{cp} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z \sqrt{\bar{u}_{li}^2 + \bar{u}_{ri}^2}$  –

среднее значение суммарной длины вектора скорости, м/с;  $\bar{u}_{li}, \bar{u}_{ri}$  – осредненные по Рейнольдсу значения составляющих вектора скорости для  $i$ -го узла конечно-элементной расчетной модели, м/с;  $l$  – текущее значение уровня жидкости в аппарате, м;  $r$  – текущее значение радиуса аппарата, м;  $z$  – общее число узлов конечно-элементной расчетной модели.

В случаях, когда локальные задачи полностью независимы друг от друга, например задачи  $VA_j, j = 1, \dots, J$ , их следует решать с применением технологий параллельных вычислений [10].

### Принцип проектируемости

Принцип проектируемости – формирование и предварительная проверка выполнения условий разрешимости задач проектирования (чаще всего, необходимых). Например, комплекс условий существования решений задачи  $RF$  и задач  $VA_j$ , используемый для определения прогнозных значений  $n_{ij}, r_{ij}, p_{ij}, i = \overline{1, I}, j \in J_i$ , необходимых для первоначального решения задачи  $RF$ , включает:

– условие возможности обработки партий каждого из продуктов в основных аппаратах всех стадий ХТС

$$\min_{j=1, \dots, J} (w_{ij}) \leq \max_{j=1, \dots, J} (w_{ij}), i = \overline{1, \dots, I}, \quad (4)$$

где  $w_{ij}$  – возможные значения размера партии  $i$ -го продукта при их обработке в аппаратах стадии  $j$ , определяемые по результатам вычислений нижних  $X_j^{\min}$  и верхних  $X_j^{\max}$  оценок определяющих размеров основных аппаратов стадий ХТС, а также верхних оценок длительностей переработки партий продуктов  $\tau_{ij}^*$  на стадиях  $j \in J_s$  (рис. 4);

– условие существования хотя бы одного основного аппарата, размер которого позволяет обрабатывать партии всех продуктов, для каждой из стадий ХТС (рис. 5)

$$[X_j^L, X_j^U] \cap XS_j \neq \emptyset, j = \overline{1, J}, \quad (5)$$

где  $X_j^L, X_j^U$  – соответственно минимальное и максимальное допустимые значения определяющего размера основных аппаратов стадии  $j$ , вычисленные с использованием значений  $w_i^{\min} = \min_{j=1, \dots, J} (w_{ij})$  и  $w_i^{\max} = \max_{j=1, \dots, J} (w_{ij})$ ;  $XS_j$  – множества размеров стандартных основных аппаратов, пригодных для установки на стадиях ХТС (формируются предварительно на основе каталогов оборудования и прайс-листов, сведений о резервном оборудовании действующего производства);

– условие обеспечения требуемой производительности ХТС

$$\sum_{i=1}^I \frac{Q_i Tc_{*i}}{\max_{j=1, \dots, J} (w_{ij})} \leq T_p, \quad (6)$$

то есть возможности выпуска всех продуктов в объемах  $Q_i$  за время  $T_p$ .

К числу условий разрешимости задачи оптимизации параметров конструкции и режима функционирования механического перемешивающего устройства вертикального емкостного аппарата можно отнести:

– ограничение на значение отношения внутреннего диаметра аппарата к диаметру мешалки

$$Gd_* \leq \frac{D_r}{D_m} \leq Gd^*, \quad (7)$$

где интервал допустимых значений  $[Gd_*, Gd^*]$  определяется типом мешалки, например для двухлопастной  $Gd_* = 1,5, Gd^* = 2,5$ ;



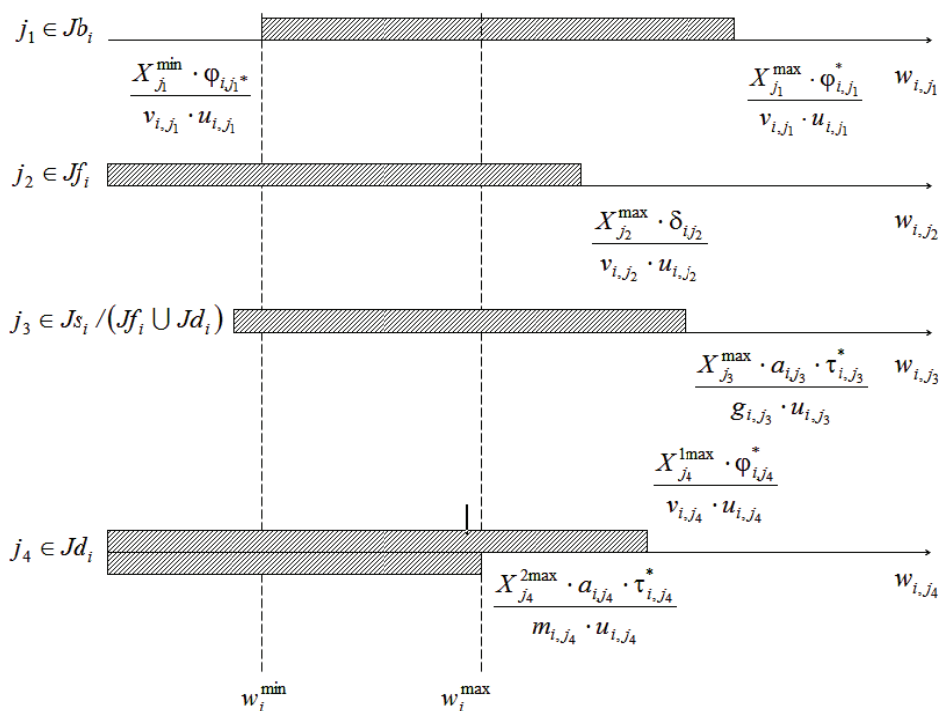


Рис. 4. Иллюстрация к условию (4) для  $i$ -го продукта:

$Jb_i, Jf_i, Jd_i$  – множества номеров стадий выпуска  $i$ -го продукта, основными аппаратами которых являются емкости с перемешивающими устройствами и без них, рамными или камерными фильтр-прессами, роторными вакуумными сушилками соответственно;  $\varphi_{ij}^*, \varphi_{ij}^{**}$  – граничные значения степени заполнения аппарата стадии  $j$  при выпуске  $i$ -го продукта;  $g_{ij}, v_{ij}, m_{ij}$  – соответственно основной, объемный и массовый материальные индексы стадии  $j$  при выпуске  $i$ -го продукта, кг/т, м<sup>3</sup>/т, м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·с);  $u_{ij}$  – доля партии (или число партий)  $i$ -го продукта, перерабатываемая в одном основном аппарате стадии  $j$

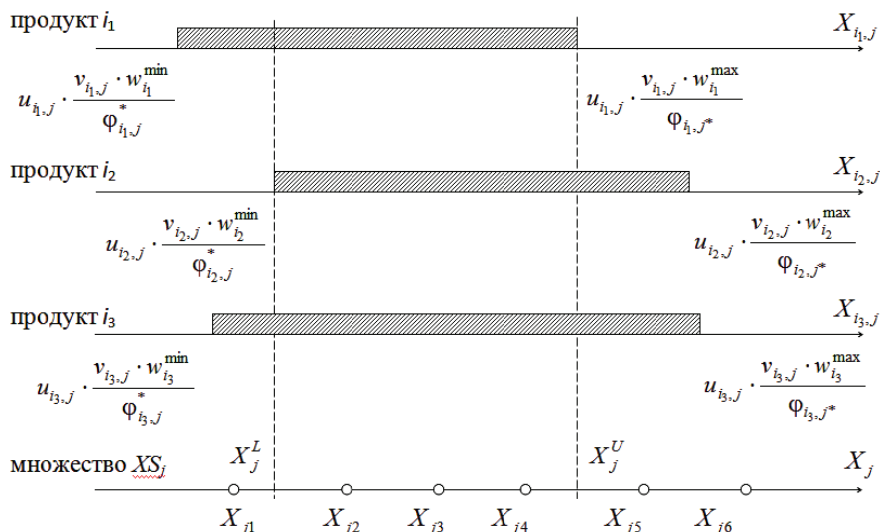


Рис. 5. Иллюстрация к условию (5):

для стадии  $j \in Jb_i, i = i_1, i_2, i_3 : [X_j^L, X_j^U] \cap XS_j = \{X_{j2}, X_{j3}, X_{j4}\}$

– ограничение на мощность привода аппарата

$$P_{\text{дв}} \leq 1,1P_{\text{max}}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{max}}$  – допустимое значение мощности, при котором на каждый  $\text{м}^3$  объема аппарата приходится 1 кВт мощности двигателя МПУ (из практического опыта эксплуатации вертикальных емкостных аппаратов).

### Заключение

Таким образом, при автоматизированном проектировании технологического оборудования многоассортиментных химических производств рекомендуется руководствоваться принципами декомпозиции общей задачи проектирования, моделирования проектных решений с ориентацией на формирование полей определяемых параметров, оптимальности проектных решений и проектируемости. Их применение обеспечило успешное выполнение следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

– разработку методики определения аппаратурного оформления химико-технологических систем многоассортиментных химических производств и ее применение для расчетов оборудования промышленных производств синтетических красителей и полупродуктов по заказам АО «Пигмент» (Тамбов);

– разработку методики определения конструкции и режима функционирования систем нагрева гидравлических прессов для термообработки резинотехнических изделий, изделий из пластмасс, металлов и сплавов, основанной на компьютерном моделировании процессов разогрева, стабилизации температуры и охлаждения нагревательных плит и изделий с применением системы конечно-элементного анализа ANSYS, и ее использование для реализации проектов АО «Завод Тамбовполимермаш».

### Список литературы

1. Малыгин, Е. Н. Методология автоматизированного проектирования технических систем с изменяемым ассортиментом продукции / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, №4. – С. 778 – 788.
2. Parageorgaki, S. Optimal Design of Multipurpose Batch Processes. 2. A Decomposition Solution Strategy / S. Parageorgaki, G. V. Reklaitis // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1990. – Vol. 29. – P. 2062 – 2073. doi: 10.1021/IE00106A014
3. Декомпозиционный алгоритм оптимизации многопродуктовых химико-технологических систем / Л. С. Гордеев, В. В. Макаров, Ю. В. Сбоева [и др.] // Программные 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 // Poster papers of 16th European Symp. on Computer Aided Process Engineering. – Garmisch-Partenkirchen, Germany. – 2006. – Vol. 21. – P. 1051 – 1056. doi: 10.1016/S1570-7946(06)80185-9
5. Мокрозуб, В. Г. Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364 – 373. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373
6. Мартьянов, Е. И. Оптимизация процесса перемешивания жидкости в вертикальных емкостных аппаратах с механическими перемешивающими устройствами / Е. И. Мартьянов, С. В. Карпушкин // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 280 – 293. doi: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.280-293

7. Open FOAM – открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред. – Текст : электрон. – URL : <http://fsweb.info/caecad/openfoam.html> (дата обращения: 10.03.2024).

8. Руководящий нормативный документ РД 26-01-90-85: Механические перемешивающие устройства, метод расчета. – Введ. с 01.01.1986. – Л. : РТП ЛенНИИхиммаша, 1985. – 257 с.

9. Карпушкин, С. В. Методика оценки эффективности аппаратурного оформления химико-технологических систем многоассортиментного производства / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 5. – С. 96 – 106.

10. Борисенко, А. Б. Применение OpenMP для оптимального выбора аппаратурного оформления многоассортиментных производств / А. Б. Борисенко, С. В. Карпушкин // Вычислительные технологии. – 2015. – Т. 20, № 4. – С. 17 – 28.

---

## Principles of Computer-Aided Design of Process Equipment for Multi-Product Chemical Industries

C. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskiy

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering,  
karp@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** automated design; multi-product chemical industry; principles of decomposition, modeling, optimality and designability; process equipment.

**Abstract:** The paper presents the principles which are recommended to be used in automated design of process equipment for multi-product chemical production: decomposition of general design problem into a number of interrelated subtasks, modeling of design solutions with orientation to the formation of fields of defined parameters, optimality of design solutions and designability. The principles are illustrated through the example of the problem of determining the hardware design of the chemical industrial system of the designed multi-product chemical industry.

### References

1. Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [Methodology of automated design of technical systems with variable product range], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 778-788. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Parageorgaki S., Reklaitis G.V. Optimal Design of Multipurpose Batch Processes. 2. A Decomposition Solution Strategy, *Ind. & Eng. Chem. Res.*, 1990, vol. 29, pp. 2062-2073. doi: 10.1021/IE00106A014

3. Gordeyev L.S., Makarov V.V., Sboyeva Yu.V. [et al.] [Decomposition algorithm for optimization of multi-product chemical-engineering systems], *Programmnyye produkty i sistemy* [Software products and systems], 1997, no. 1, pp. 2-10. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Pinto T., Barbósa-Póvoa A., Novais A. Decomposition Based Algorithm for the Design and Scheduling of Multipurpose Batch Plants. *Poster papers of 16th European Symp. on Computer Aided Process Engineering*, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2006, pp. 1051-1056. doi: 10.1016/S1570-7946(06)80185-9

5. Mokrozub V.G., Malygin Ye.N., Karpushkin S.V. [Systems analysis of decision-making processes in the development of technological equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 364-373. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Mart'yanov Ye.I., Karpushkin S.V. [Optimization of the liquid mixing process in vertical tank apparatuses with mechanical mixing devices], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 2, pp. 280-293. doi: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.280-293 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Available at: <http://fsweb.info/caecad/openfoam.html> (accessed 10 March 2024).

8. RD 26-01-90-85. *Mekhanicheskiye peremeshivayushchiye ustroystva, metod rascheta* [Mechanical mixing devices, calculation method], Leningrad: RTP LenNIikhimmasha, 1985. 257 p. (In Russ.)

9. Karpushkin S.V., Krasnyanskiy M.N., Borisenko A.B. [Methodology for assessing the efficiency of hardware design of chemical-technological systems for multi-product production], *Informatsionnyye sistemy i tekhnologii* [Information systems and technologies], 2011, no. 5, pp. 96-106. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Borisenko A.B., Karpushkin S.V. [Application of OpenMP for optimal selection of hardware design of multi-product production], *Vychislitel'nyye tekhnologii* [Computing technologies], 2015, vol. 20, no. 4, pp. 17-28. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Prinzipien des computergestützten Designs der technologischen Ausrüstung der Multisortiment-chemischen Produktion**

**Zusammenfassung:** Der Beitrag stellt die Prinzipien vor, die bei der automatisierten Projektierung von technologischen Anlagen für die chemische Mehrsortimentsproduktion zu befolgen sind: Zerlegung des allgemeinen Projektierungsproblems in eine Reihe von zusammenhängenden Teilaufgaben, Modellierung von Projektierungslösungen mit Orientierung auf die Bildung von Feldern bestimmter Parameter, Optimalität von Projektierungslösungen und Projektierbarkeit. Die Prinzipien sind am Beispiel des Problems der Bestimmung des Hardware-Designs des chemisch-technologischen Systems der geplanten Mehrsortiment-Chemieproduktion illustriert.

---

### **Principes de conception assistée par ordinateur de l'équipement technologique de la production chimique multi-gamme**

**Résumé:** Sont présentés les principes qui sont recommandés pour guider la conception automatisée de l'équipement technologique des productions chimiques multi-gammes: la décomposition de la tâche de conception globale en un certain nombre de sous-tâches interconnectées, la modélisation des solutions de conception axées sur la formation de champs de paramètres définis, l'optimalité des solutions de conception et la constructibilité. Les principes sont illustrés à l'exemple de la tâche de la détermination de la conception matérielle du système chimique et technologique de la production chimique multi-gamme projetée.

---

**Автор:** *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Краснянский Михаил Николаевич* – доктор технических наук, профессор, ректор, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.