

# Интеграция концептуального моделирования и программирования в ограничениях для синтеза схем технологических процессов\*

А. А. Зуенко, А. Г. Олейник, Ю. А. Олейник

Институт информатики и математического моделирования — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр Российской академии наук” (ИИММ КНЦ РАН), г. Апатиты, Россия

**Аннотация.** Представлена информационная технология структурного синтеза схем многостадийных технологических процессов на основе интеграции методов концептуального моделирования и программирования в ограничениях. Актуальность разработки обусловлена тем, что существующие решения в области структурного синтеза не предлагают средств для формального описания разнородных ограничений на сочетания структурных элементов при формировании целевого объекта. Интеграция методов концептуального моделирования и программирования в ограничениях обеспечивает формализованное описание, автоматизированный учет и анализ разнородных ограничений как на сочетаемость реализующего процесс оборудования, так и на показатели эффективности. В качестве примера рассматриваются технологические процессы обогащения минерального сырья. Описаны формальные структуры, характеризующие как свойства объекта обработки, так и оборудования, реализующего основные технологические операции процесса. Представлены примеры ограничений на синтезируемую структуру технологического процесса и элементы инструментальной системы, реализующей разработанную технологию.

**Ключевые слова:** структурный синтез, технологический процесс, концептуальное моделирование, программирование в ограничениях, задача удовлетворения ограничений.

DOI 10.14357/20718632220309

## Введение

Среди подходов к решению задачи структурного синтеза наибольшее распространение в системах автоматизированного проектирования получили комбинаторно-логические методы, основанные на организованном переборе аналогов и альтернатив, например, с использованием теории графов [1-5]. При этом используется понятие обобщенной структуры класса объектов [4], а множество известных альтерна-

тив образует комбинаторное пространство, в рамках которого синтезируется решение. Применяемые модели предметной области являются композиционными: описывают только разрешенные сочетания элементов, полученные по правилам композиции данной обобщенной структуры. Большинство известных подходов к решению задачи структурного синтеза [2-5] не предлагают средств для формального описания разнородных ограничений на сочетания структурных элементов при формировании целевого

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты №№ 19-07-00359-а, 20-07-00708а.

объекта. В статье [1] представлен подход к структурному синтезу с ограничениями, но в нем отсутствует поддержка иерархической декомпозиции проектируемой сложной системы и сделан акцент на анализ бинарных ограничений на сочетаемость элементов.

В данной работе предлагается технология структурного синтеза схем многостадийных технологических процессов (ТП), обеспечивающая формализованное описание, учет и автоматизированный анализ разнородных, не обязательно бинарных, ограничений как на сочетаемость реализующего процесс оборудования, так и на показатели эффективности процесса. Разработка основана на интеграции технологий концептуального моделирования [6, 7] и программирования в ограничениях.

В контексте задачи структурного синтеза схем ТП в виде концептуальной модели формально описываются варианты реализации этих процессов.

Каждую конкретную задачу структурного синтеза на элементах с ограниченной сочетаемостью в настоящей работе предлагается решать как задачу удовлетворения ограничений (Constraint Satisfaction Problem – CSP) [8]. Это позволяет воспользоваться для ее решения богатым арсеналом методов и эвристик, разработанных в теории удовлетворения ограничений. В качестве основы для представления ограничений задачи CSP используются новые виды табличных ограничений. Для них авторами разработаны базовые методы распространения [9], более эффективные в сравнении с методами, основанными на представлении качественных ограничений в виде логических формул, правил и т.п.

## 1. Формализация задачи синтеза структурных схем многостадийных технологических процессов

ТП предлагается рассматривать как систему, структурной ячейкой (элементом) которой является технологическая операция. Для реализации операций необходимо применение технологического оборудования и использование определенных ресурсов, в первую очередь – энергии. ТП, состоящие из последовательности

производственных стадий, называют многостадийными.

Проектирование ТП включает в себя ряд иерархических уровней от разработки принципиальной схемы процесса до определения необходимого оборудования для реализации операций. Результатом синтеза схемы ТП должно являться определение последовательности всех операций (подпроцессов) обработки сырья и реализующих их аппаратов с указанием применяемых параметров обработки. Трудности проектирования ТП обусловлены наличием многочисленных взаимосвязей между составляющими процесса, обилием ограничительных условий как на значения параметров процесса, так и на сочетаемость его элементов.

Ввиду изложенного, представляется актуальной задача создания информационной технологии и инструментальных средств автоматизации структурного синтеза схем многостадийных ТП. Для ее решения предлагается интегрировать технологии концептуального моделирования ТП и программирования в ограничениях.

Системы концептуального моделирования разработаны для проектирования программных комплексов [6] и расширены для исследования природно-технических систем [7]. Концептуальная модель (КМ) позволяет декларативно описывать состав и иерархическую структуру объекта, а также указывать пользовательские типы элементов, которые играют ключевую роль при проведении процедур автоматизированного анализа корректности КМ.

Задача структурного синтеза технологических схем сопряжена с перебором большого количества альтернатив реализации ТП. Для задания пространства поиска (пространства альтернатив) разработана инструментальная среда, позволяющая в виде концептуальной модели ТП описывать различные уровни его декомпозиции и задавать ограничения на разных уровнях.

Схема КМ технологического процесса имеет следующий вид:

$$S_{КМ\text{ по}} ::= \langle P, R, H_p, In, Out \rangle.$$

$P = \{p_i\}$  – множество процессов возможных технологических схем;

$R = R_m \cup R_t$  – участвующие и используемые в ТП ресурсы, где  $R_m = \{rm_j\}$  – обрабатываемые

материальные потоки, связывающие процессы, а  $R_i = \{rt_k\}$  – технологические ресурсы, необходимые для реализации процессов обработки (электроэнергия и др.);

$H_p \subseteq P \times B(P)$  – отношения иерархии процессов (здесь и далее обозначение  $B(*)$  используется для описания булеана множества \*);

$In \subseteq B(R) \times P$  – отношения “входные ресурсы – процесс”;

$Out \subseteq P \times B(R)$  – отношения “процесс – выходные ресурсы”.

Обязательными атрибутами всех процессов и ресурсов КМ являются их имена и типы, а также тип отношения иерархии (иерархия по “и” или по “или”), соотнесенный с данным элементом КМ.

Множество  $P$  включает два подмножества:

$$P = P_{complex} \cup P_{primitive},$$

Процессы, принадлежащие множеству  $P_{complex}$ , моделируют на различных уровнях абстракции преобразования обрабатываемых ресурсов в рамках ТП. К ним относятся процессы таких базовых типов, как “Технологический процесс”, “Стадия”, “Операция”. Процессы из множества  $P_{primitive}$  соответствуют листовым вершинам дерева процессов и имеют базовый тип “Элементарный процесс” (процесс, реализуемый конкретным аппаратом). При этом, каждая листовая вершина считается уникальной, и, как следствие, дерево КМ не имеет тождественных вершин. При необходимости на основе любого базового типа может быть создан его подтип с дополнительными ограничениями.

Модель атрибутов формируется с учетом специфики конкретного ТП.

В КМ иерархия процессов неявно индуцирует иерархию ресурсов ( $H_R \subseteq R \times B(R)$ ).

На основе одной и той же КМ задачу структурного синтеза ТП можно ставить в различных постановках. Это зависит от конкретных характеристик процессов, имеющих ограничений, а также критериев оптимизации. Решение задачи структурного синтеза в терминах КМ сводится к выбору такого подграфа (поддерева) КМ, который не содержит связей по “или”, а все листовые вершины соответствуют операциям, реализуемым конкретными аппаратами.

Для удобства пользователя в разработанной системе структурного синтеза большинство ограничений на элементы КМ генерируются автоматически, в частности, на основе анализа типов этих элементов. Представление в системе ограничений, определяемых семантикой типов элементов – это функция инженера по знаниям. Общее ограничение на сочетаемость элементов, реализующих ТП, заключается в том, что выходы операции (подпроцесса) должны соответствовать ограничениям, накладываемым на входы непосредственно следующих за ним операций (подпроцессов). Однако пользователь не лишен возможности и самостоятельно задавать ограничения, например, описывающие условия сочетаемости конкретных аппаратов в рамках одной структурной схемы.

На Рис. 1 и 2 показаны фрагменты графического интерфейса разработанной системы структурного синтеза ТП. Семантика моделируемого технологического процесса подробно поясняется в последующих подразделах. В главном окне системы отображается иерархия

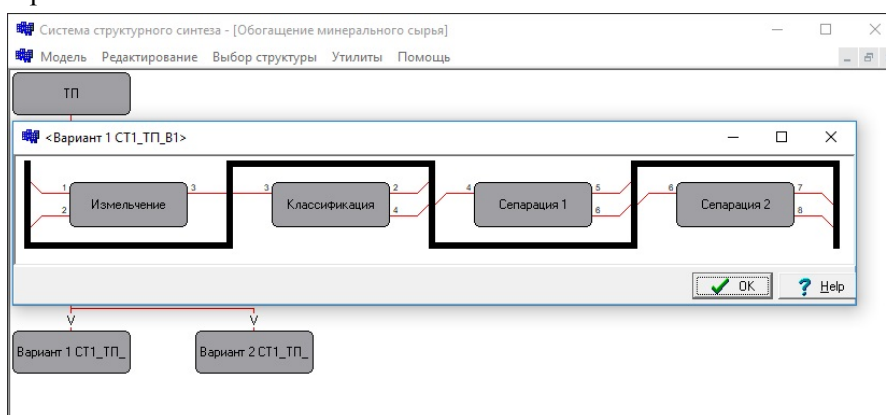


Рис. 1. Главное окно графического редактора, представляющее иерархию процессов, и дочернее окно, отображающее связи по ресурсам между подпроцессами некоторого процесса

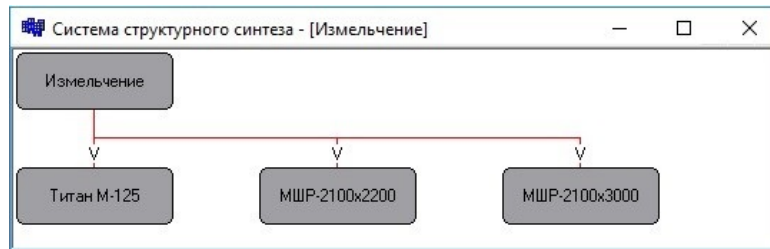


Рис. 2. Окно редактора, представляющее варианты реализации операции измельчения

процессов (на заднем плане Рис. 1). С образом процесса связано “дочернее” окно (на переднем плане Рис. 1), отображающее внутреннюю структуру процесса – связи по ресурсам между его подпроцессами (операциями). В свою очередь, при выборе операции открывается окно, позволяющее назначить для данной операции варианты конкретных аппаратов, обеспечивающих ее реализацию (Рис. 2). Вновь введенные варианты реализации операции тут же отображаются в главном окне графического редактора дерева процессов.

На основе введенной пользователем информации, а также знаний, заложенных в систему моделирования инженером по знаниям, реализуются два режима функционирования системы:

1) режим построения и автоматического контроля корректности описания модели предметной области;

2) режим синтеза оптимальной, или просто допустимой схемы ТП.

Задачи анализа корректности и синтеза описываются и решаются как задачи удовлетворения ограничений.

Знания могут быть представлены в декларативной форме или “защиты” в программный код системы моделирования. Декларативный подход к представлению и анализу ограничений в системах концептуального моделирования был впервые предложен в работе [10]. В этой же работе предлагалось решение задачи контроля корректности модели путем ее сведения к серии запросов к базе данных системы моделирования, то есть к набору задач удовлетворения ограничений. Декларативное представление ограничений может быть реализовано как средствами специализированного редактора метаданных со своим языком ограничений, так и с использованием стандартной нотации описания ограничений, например, на

языке OCL (Object Constraint Language) [11] с помощью графического редактора сторонних разработчиков.

В режиме построения КМ конечный пользователь должен с помощью инструментальной среды описать иерархию процессов предметной области; определить типы процессов и ресурсов; задать их параметры; выбрать характеристику технологического процесса, которую следует оптимизировать.

Как уже упоминалось, решение каждой конкретной задачи структурного синтеза в рамках предлагаемой технологии предлагается сводить к решению соответствующей задачи удовлетворения ограничений.

## 2. Программирование в ограничениях

Для применения технологии программирования в ограничениях любая задача должна быть сформулирована как задача удовлетворения ограничений, состоящая из трех компонент [8]:

$$\langle X, Dom, C \rangle,$$

где:  $X$  – множество переменных  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ;  $Dom$  – множество доменов переменных  $\{Dom_1, Dom_2, \dots, Dom_n\}$ , где  $Dom_i$  является доменом (областью определения) переменной  $X_i$ ;  $C$  – множество ограничений  $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ , которые предписывают допустимые комбинации значений переменных.

Каждый домен  $Dom_i$  описывает множество допустимых значений  $\{v_1, \dots, v_k\}$  для переменной  $X_i$ . Под ограничением понимается любое соотношение между переменными предметной области.

Решением задачи CSP является полное присваивание, которое удовлетворяет всем ограничениям. В некоторых случаях необходимо получить все решения. Иногда требуется найти

такое решение, в котором значения переменных оптимизировали бы некоторый заданный функционал.

Набор однотипных ограничений целесообразно объединять в одно ограничение, разрабатывая для данного набора эффективные алгоритмы распространения. Такие составные ограничения называют глобальными [8]. В настоящей работе для эффективной обработки зависимостей используются такие глобальные ограничения как ограничение *scalar* (скалярное произведение) и табличные ограничения [12-14], в том числе и их новые виды, разработанные ранее одним из авторов [9].

В представленных исследованиях используется подключаемая библиотека программирования в ограничениях Choco [15], поскольку разработанные с ее использованием методы могут быть легко интегрированы в специализированные программные комплексы для автоматизации задач структурного синтеза.

### 3. Концептуальная модель технологического процесса обогащения минерального сырья

Рассмотрим в качестве примера задачу проектирования процесса обогащения минерального сырья. Пусть необходимо синтезировать ТП обогащения некоторой двухкомпонентной руды, содержащей в определенном соотношении полезные минералы и минералы, не имеющие промышленной ценности (“пустую породу”). Цель ТП заключается в разделении полезных компонентов руды, формирующих товарный концентрат, и пустой породы, выводимой в отходы (хвосты) обогатительного производства.

Задача структурного синтеза в рассматриваемом примере состоит в определении наиболее эффективного (по заданным критериям) варианта схемы соединения аппаратов для реализации как отдельных стадий, так и всей технологической схемы процесса обогащения на основе анализа свойств перерабатываемого массопотока, допустимых технологических маршрутов обогащения, набора устройств, сведения о характеристиках которых хранятся в базе данных инструментальной системы синтеза, и базовых принципов связи устройств друг с другом.

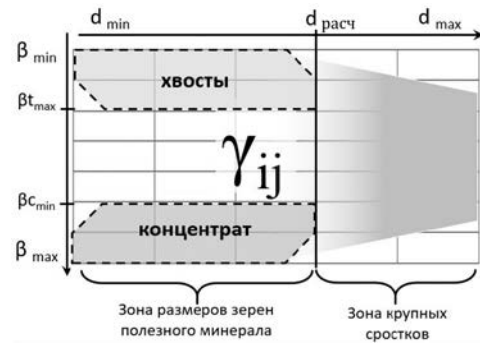


Рис 3. Описание массопотока

В качестве критерия эффективности чаще всего используется стоимость получаемого концентрата. Кроме этого могут учитываться и дополнительные ограничения, например, ресурсного или экологического характера.

Состав массопотоков в обогащении традиционно описывается таблицей  $\|\gamma_{ij}\|$ , в рамках которой частицы массопотока разбиваются на ряд классов по крупности частиц ( $D$ ) и по содержанию в них полезного компонента ( $\beta$ ). Число  $\gamma_{ij}$  в ячейке обозначает, какую долю от общего массопотока составляют частицы соответствующего размера и содержания полезного компонента (Рис. 3).

В таблице  $\|\gamma_{ij}\|$  можно условно выделить зону хвостов и зону концентрата (Рис. 3). Горизонтальные границы этих зон определяются нормативами содержания полезного компонента в хвостах и концентрате, вертикальные же зависят от размеров зерен ценного минерала и параметров сепараторов, используемых для выделения соответствующих компонентов потока.

Основными операциями каждой стадии рассматриваемого процесса являются: измельчение (уменьшение крупности), классификация (разделение по крупности) и сепарация (разделение по различию физических и/или физико-химических свойств полезного минерала и пустой породы).

Операции измельчения не изменяют величину входного массопотока, но приводят к перераспределению частиц в выходном потоке от более крупных классов к более мелким (Рис. 4). Эти операции можно задать таблицей  $\|f_{ij}\|$ , аналогичной по структуре таблице  $\|\gamma_{ij}\|$ , характеризующей массопоток. Таблицы  $\|f_{ij}\|$

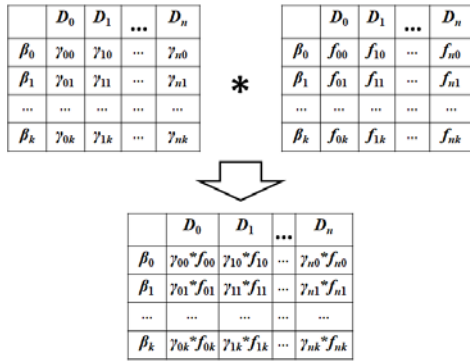


Рис. 4. Преобразования массопотока в операции измельчения

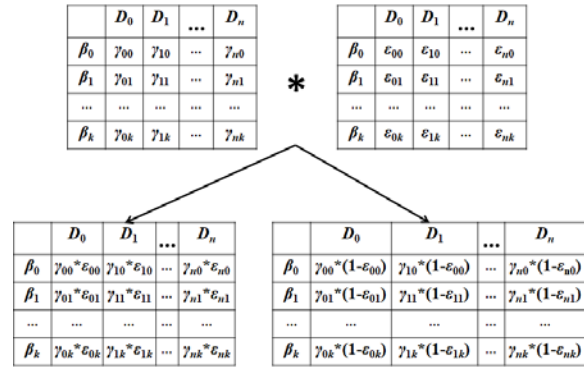


Рис. 5. Преобразования массопотока операциями классификации и сепарации

задают преобразование значений  $\gamma_{ij}$  входного потока в новые значения  $\gamma_{ij} * f_{ij}$  выходного потока. Они являются характеристиками мельниц и хранятся в базе данных вместе с другими параметрами этих устройств.

Операции классификации и сепарации в данном представлении имеют много общего. Обе эти операции делят входящий поток на два выходящих и могут быть описаны таблицами  $\|\epsilon_{ij}\|$  (Рис. 5), которые также аналогичны по структуре таблицам  $\|\gamma_{ij}\|$ . Значение  $\epsilon_{ij}$  означает вероятность попадания частицы соответствующего размера и содержания полезного компонента в один из выходных потоков. Вероятность попадания во второй выход будет соответственно  $(1 - \epsilon_{ij})$ . То есть, операция делит входной поток следующим образом (Рис. 5):

Разница между классификаторами и сепараторами заключается в том, что классификаторы с большей вероятностью отправляют в один выходной поток частицы большего/меньшего размера, а сепараторы – большего/меньшего содержания полезного компонента.

Таблицы  $\|\epsilon_{ij}\|$  являются характеристиками конкретных устройств (классификаторов или сепараторов) и хранятся вместе с другой информацией о них.

В качестве типов процессов КМ, которые являются наследниками базового типа “Операция”, выступают “Измельчение”, “Классификация”, “Сепарация хвостов”, “Сепарация концентрата”.

Типами ресурсов множества  $R_m$  в рассматриваемом примере являются: “Хвосты”, “Концентрат”, “Промпродукт”. Состав типов мно-

жества  $R_t$  включает такие типы, как “Энергия”, “Вода”, “Реагент” и т. п.

Кратко опишем используемую модель атрибутов элементов КМ. Каждому процессу из множества  $P_{primitive}$  сопоставляется экземпляр реализующего его оборудования и одна или несколько таблиц  $\|k_{ij}\|$  (по количеству выходов процесса). Для мельниц в качестве  $\|k_{ij}\|$  принимается таблица  $\|f_{ij}\|$ , а для классификаторов и сепараторов – таблицы  $\|\epsilon_{ij}\|$ . Также каждой операции задается ее производительность – массопоток, обрабатываемый в единицу времени. Стоимостные показатели реализации процесса определяются из стоимости и объемов потребляемых данным процессом технологических ресурсов. Если стоимость операции различна для разных фракций массопотока, то она описывается таблицей вида  $VC(D, \beta) = \|vc_{ij}\|$  (для каждого выхода в отдельности), где  $vc_{ij}$  – удельная стоимость преобразования соответствующей фракции в данной операции.

Каждому элементу из множества ресурсов  $R_m$  сопоставляется таблица  $\|\gamma_{ij}\|$ . Для технологических ресурсов  $R_t$  задаются стоимостные характеристики и, при необходимости, ограничения на располагаемые/допустимые к использованию объемы.

Возможность присутствия того или иного элемента в синтезируемой схеме ТП определяется исходя из анализа соответствующих характеристик массопотоков (различных участков таблиц  $\|\gamma_{ij}\|$ ). Причем, ограничения на сочетаемость в этом случае не являются бинарными.

При задании ограничений, в том числе и на сочетаемость элементов, ТП рассматривается специалистами предметной области на различных уровнях детализации. На Рис. 6-11 представлен пример последовательной декомпозиции ТП обогащения.

При использовании обобщенного представления ТП (Рис. 6) специалист предметной области задает требования по общей производительности проектируемой схемы, а также условия отнесения разделяемых в процессе переработки массопотоков к концентрату и хвостам: содержание полезного компонента в потоке  $rn_3$  не должно быть ниже заданного порога

$\beta_k$ , а в потоке  $rn_2$  – не превышать заданного небольшого значения  $\beta_{хв}$ :

$$\frac{\sum_{j=0}^k (\beta_j * \sum_{i=0}^n \gamma_{ij})}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^k \gamma_{ij}} < \beta_{хв};$$

$$\frac{\sum_{j=0}^k (\beta_j * \sum_{i=0}^n \gamma_{ij})}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^k \gamma_{ij}} > \beta_k.$$

Можно учитывать и иные ограничения, например, необходимое для размещения технологической схемы пространство на предприятии, совокупная потребляемая энергия и т.д. Задание ограничений для каждой из стадий ТП осуществляется на уровне декомпозиции, показанном на

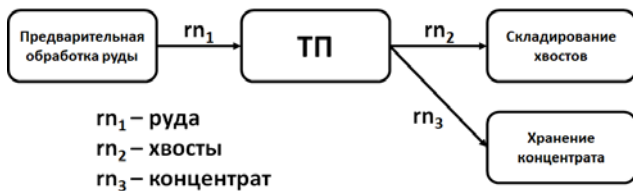


Рис. 6. Обобщенное представление ТП

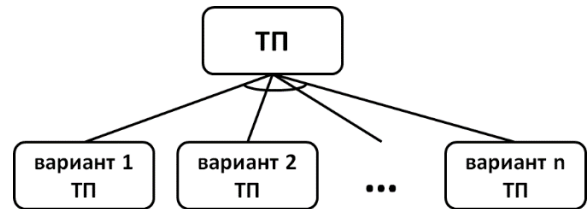


Рис. 7. Варианты реализации ТП 1

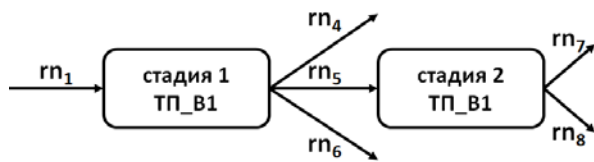


Рис. 8. Пример варианта ТП

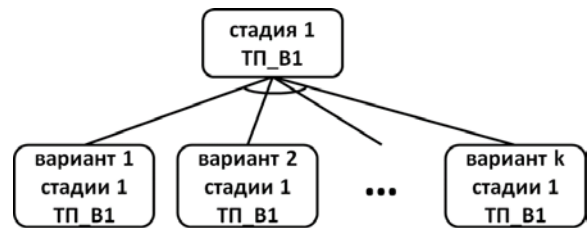


Рис. 9. Варианты реализации некоторой стадии ТП



Рис. 10. Пример варианта стадии ТП

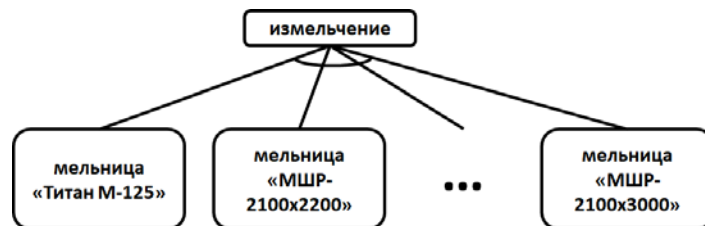


Рис. 11. Варианты процессов-исполнителей технологической операции

Рис. 8. Для листовых процессов (Рис. 11), которые соответствуют конкретным аппаратам с выбранными параметрами, также могут быть заданы специфические ограничения.

Приведем некоторые примеры ограничений, которые используются на этапе контроля корректности модели, но не задаются конечным пользователем явно. К ним, в частности, относятся ограничения на согласованность типов различных элементов модели, например: “У объекта, имеющего пользовательский тип “Сепарация хвостов” один из двух выходных ресурсов должен иметь пользовательский тип “Хвосты””. Также ограничениями, полезными на этом этапе, являются ограничения, направленные на поддержку согласованности при задании таблиц (таблицы  $\|\varepsilon_{ij}\|$  и  $\|f_{ij}\|$ ) для различных выходов процессов, соответствующих конкретным типам исполнительных устройств. Например, для двух выходов процессов, реализуемых классификаторами и сепараторами, задаваемых характеристиками  $\|\varepsilon_{ij}^{out1}\|$  и  $\|\varepsilon_{ij}^{out2}\|$ , должно выполняться соотношение:  $\varepsilon_{ij}^{out1} + \varepsilon_{ij}^{out2} = 1$ .

Ограничения, необходимые для выполнения этапа структурного синтеза, рассматриваются ниже.

#### 4. Представление задачи структурного синтеза в виде задачи удовлетворения ограничений

Рассмотрим упрощенную формулировку конкретной задачи структурного синтеза. Допустим, каждому процессу в иерархии сопоставлены два атрибута: 1)  $S$  – площадь помещения, требуемая для размещения оборудования, реализующего процесс; 2) удельная стоимость выполнения операции. Требуется синтезировать такую структуру ТП, которая обеспечивает минимальную удельную стоимость затрат ( $C \rightarrow \min$ ) при заданном входном массопотоке, а также не превышает имеющуюся площадь ( $S \leq s_1$ ). При этом накладываются ограничения на сочетаемость оборудования, продиктованные типами структурных элементов.

Описание переменных будем производить в объектно-ориентированном стиле, как это ре-

ально и осуществляется в большинстве библиотек программирования в ограничениях.

Основными программными классами являются класс “Процесс” и класс “Ресурс”.

Класс “Процесс” в качестве атрибутов, помимо имени и типа, содержит: *inres*[] – массив входных ресурсов процесса; *oures*[] – массив выходных ресурсов данного процесса; массив подпроцессов *subprocesses*[], также класс “Процесс” содержит атрибуты *C* и *S*, на значения которых накладываются ограничения.

“Процесс” имеет класс-наследник “Элементарный процесс”, который соответствует листовым процессам, выполняемым конкретными аппаратами. По сравнению с базовым классом он обладает дополнительными атрибутами: массив *vc*[][][], содержащий пофракционные удельные стоимости для каждого выхода элементарного процесса; массив *func*[][][], содержащий таблицы вида  $\|k_{ij}\|$  для каждого выхода элементарного процесса.

Ограничения накладываются на такие атрибуты класса “Ресурс”, как *gamma*[][] – массив выходов фракций крупности для данного потока и *subresources*[] – массив ресурсов, непосредственно связанный с данным ресурсом отношениями иерархии.

Концептуальная модель ТП транслируется в программную структуру, называемую далее “Деревом процессов” (ДП). ДП, построенное для примера ТП, показанного на Рис. 6-11, приводится на Рис. 12.

Каждому узлу ДП соответствует экземпляр программного класса “Процесс”. Каждому узлу ДП сопоставляется логическая переменная, указывающая на то, активен ли данный узел или нет. Введем обозначения для экземпляров класса “Процесс”, представленных на Рис. 12:

$P^0$  – процесс, который соответствует вершине “ТП”;

$P_1^1, P_2^1, \dots, P_n^1$  – процессы, соответствующие вершинам “Вариант 1 ТП”, ..., “Вариант  $n$  ТП”;

$P_1^2, P_2^2$  – процессы, соответствующие вершинам “Стадия 1 ТП\_V1”, “Стадия 2 ТП\_V1”;

$P_1^3, P_2^3, \dots, P_k^3$  – процессы, соответствующие вершинам “Вариант 1 СТ1\_ТП\_V1”, ..., “Вариант  $k$  СТ1\_ТП\_V1”;



$P_1^4, P_2^4, P_3^4, P_4^4$  – процессы, соответствующие вершинам “Измельчение”, “Классификация”, “Сепарация 1”, “Сепарация 2”;

$P_1^5, P_2^5, \dots, P_m^5$  – процессы, соответствующие конкретным экземплярам обогатительных аппаратов.

Введем логические (булевы) переменные для вершин ДП:

$x_0$  – переменная, соответствующая вершине “ТП”;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – переменные, соответствующие вершинам “Вариант 1 ТП”, ..., “Вариант n ТП”;

$y_1, y_2$  – переменные, соответствующие “Стадия 1 ТП\_В1”, “Стадия 2 ТП\_В1”;

$z_1, z_2, \dots, z_k$  – переменные, соответствующие вершинам “Вариант 1 СТ1\_ТП\_В1”, ..., “Вариант k СТ1\_ТП\_В1”.

$v_1, v_2, v_3, v_4$  – переменные, соответствующие вершинам “Измельчение”, “Классификация”, “Сепарация 1”, “Сепарация 2”.

$w_1, w_2, \dots, w_m$  – переменные, соответствующие конкретным исполнительным устройствам.

Присваивание 0 (ложь) логической переменной соответствует случаю, когда данная вершина (процесс) не включается в решение, то есть в синтезируемую схему ТП.

ДП представляет собой И-ИЛИ граф. Покажем, как связи по “И” и по “ИЛИ” (Рис. 13 и 14) представляются с помощью логических формул и табличных ограничений, поскольку в настоящей работе качественные ограничения предлагается обрабатывать именно в форме табличных ограничений.

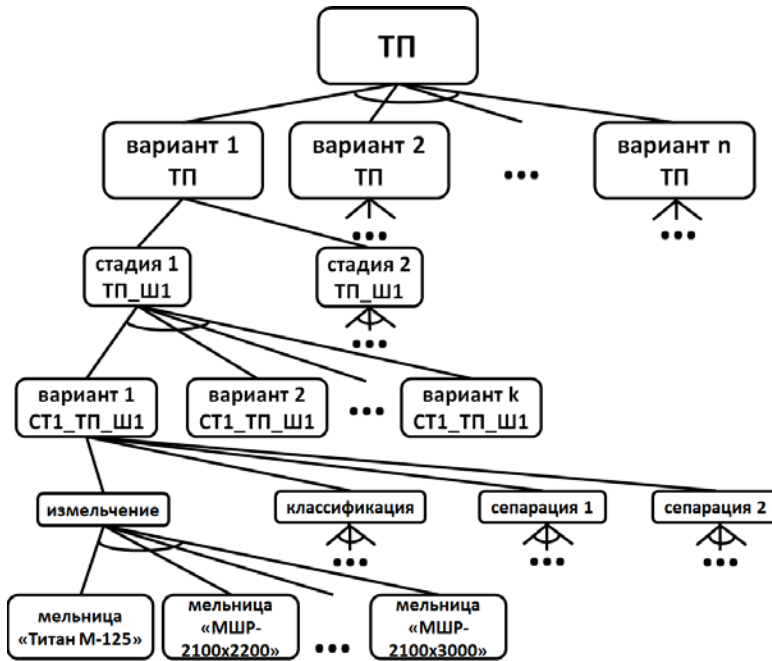


Рис. 12. Дерево процессов

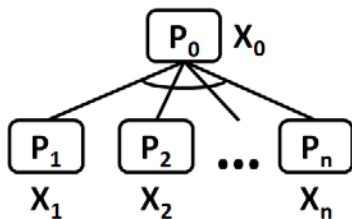


Рис. 13. Связь по “ИЛИ”

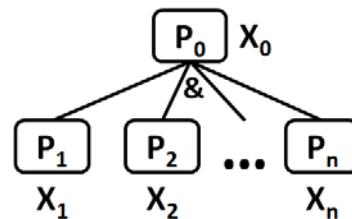


Рис. 14. Связь по “И”

Представление в виде логических формул связи по “ИЛИ”:

$$X_0 \leftrightarrow X_1 \vee X_2 \vee \dots \vee X_n;$$

$$X_1 \overline{X_2} \dots \overline{X_n} \vee \overline{X_1} X_2 \overline{X_3} \dots \overline{X_n} \vee \overline{X_1} \overline{X_2} \dots \overline{X_{n-1}} X_n.$$

Представление связи по “ИЛИ” в форме табличного ограничения:

$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	...	$X_n$
0	0	0	0	...	0
1	1	0	0	...	0
1	0	1	0	...	0
1	0	0	1	...	0
...	...	...	...	...	...
1	0	0	0	...	1

Представление связи по “И” в виде логических формул:

$$X_0 \leftrightarrow X_1 \wedge X_2 \wedge \dots \wedge X_n;$$

$$\overline{X_0} \rightarrow \overline{X_1} \wedge \overline{X_2} \wedge \dots \wedge \overline{X_n}.$$

Представление связи по “И” в форме табличного ограничения:

$X_0$	$X_1$	$X_2$	...	$X_{n-1}$	$X_n$
1	1	1	...	1	1
0	0	0	...	0	0

ДП используется для автоматической генерации не прописанных явно ограничений. На основании анализа ДП автоматически генерируются следующие ограничения, устанавливающие связь между характеристикой  $S$  для процессов, располагающихся на различных уровнях иерархии:

$$P^0.S = x_1 * P_1^1.S + x_2 * P_2^1.S + \dots + x_n * P_n^1.S;$$

$$P_1^1.S = y_1 * P_1^2.S + y_2 * P_2^2.S;$$

$$P_1^2.S = z_1 * P_1^3.S + z_2 * P_2^3.S + \dots + z_k * P_k^3.S;$$

$$P_1^3.S = v_1 * P_1^4.S + v_2 * P_2^4.S + v_3 * P_3^4.S + v_4 * P_4^4.S;$$

$$P_1^4.S = w_1 * P_1^5.S + w_2 * P_2^5.S + \dots + w_m * P_m^5.S.$$

$P_1^5, \dots, P_m^5$  являются листовыми узлами в ДП, которым присваиваются конкретные аппараты. Домены переменных  $P_1^5.S, \dots, P_m^5.S$  определяются на основе анализа базы данных существующего оборудования.

Каждое из подобных ограничений можно записать с помощью глобального ограничения *scalar*. Для первого уравнения получим следующую запись в виде глобального ограничения:

$$scalar(\{x_1; x_2; \dots; x_n; -1\}; \{P_1^1.S; P_2^1.S; \dots; P_n^1.S\}; =; 0).$$

Аналогичные соотношения можно записать и для такой характеристики, как удельная стоимость ТП ( $C$ ).

Ограничение “Площадь помещения ( $S$ ), отводимого для размещения аппаратов, реализующих ТП, не превышает  $s_1$ ” будет иметь вид:  $P^0.S \in (0, s_1]$ .

Для ресурсов на разных уровнях иерархии взаимосвязь (согласование) однотипных характеристик, реализуется по аналогии с процессами. Так, например, для входных ресурсов процессов двух нижних уровней иерархии (Рис. 11), будет справедливо соотношение:

$$P_1^4.inres[k].gamma[i][j] =$$

$$= w_1 * P_1^5.inres[k].gamma[i][j] +$$

$$+ w_2 * P_2^5.inres[k].gamma[i][j] + \dots +$$

$$+ w_m * P_m^5.inres[k].gamma[i][j].$$

Рассмотрим, как представляются ограничения на сочетаемость элементов. В качестве примера возьмем процессы, изображенные на Рис. 10, а именно процесс “Сепарация 1” (переменная  $P_3^4$ ), имеющий тип “Сепарация хвостов”. Ему соответствует логическая переменная  $v_3$ , для которой на основании анализа типа процесса автоматически будет сгенерировано ограничение:

$$v_3 \rightarrow$$

$$\rightarrow (\sum_{i=1}^{I_1} \sum_{j=1}^{I_2} (P_3^4.inres[0].gamma[i][j] * Q) > h_{хв}),$$

где:  $h_{хв}$  – пороговое значение объема “чистой” пустой породы в массопотоке, которого достаточно для того, чтобы операция выделения хвостов была целесообразна;  $I_1 = ind(\beta t_{max})$  и  $I_2 = ind(d_{расч})$  – индексы элементов таблицы, для которых  $\beta = \beta t_{max}$  и  $D = d_{расч}$ , соответственно;  $Q$  – расход потока [т/час].

При несоблюдении выражения, заключенного в скобки (при недостаточном количестве “чистой” пустой породы во входном потоке) переменная  $v_3$  обращается в 0 (ложь). При этом, связанные с ней логические переменные более низкого уровня иерархии, которые соответствуют конкретным аппаратам, также обращаются в 0. Равенство 0 переменной  $v_3$  приводит к тому, что нулю становятся равны переменные  $v_1, v_2, v_4$ , а также переменная  $z_1$ . Таким образом, после осуществления распространения ограничений из рассмотрения исключается целая вет-

ка, соответствующая первому варианту реализации стадии ТП.

По аналогии, в виде необходимого условия существования вершины ДП, формулируются условия на выход по хвостам и по концентрату для вершины “Технологический процесс (ТП)”.

Конкретными исполнителями, реализующими измельчение (Рис. 12), являются различные мельницы (процессы  $P_1^5, \dots, P_m^5$ ). Для них формируются однотипные ограничения на основе таблиц  $\|f_{ij}\|$ . Для ( $P_1^5$ ) ограничение записывается так:

$$\begin{aligned} w_1 &\rightarrow (P_1^5.func[0][i][j] * \\ &* P_1^5.inres[0].gamma[i][j] = \\ &= P_1^5.outres[0].gamma[i][j]). \end{aligned}$$

На уровне процессов-исполнителей также высчитываются издержки производства каждого выходного потока. Соответствующее ограничение для процесса ( $P_1^5$ ) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} w_1 &\rightarrow \left( \sum_i^n \sum_j^k \left( (P_1^5.outres[0].gamma[i][j] * \right. \right. \\ &\left. \left. * P_1^5.vc[0][i][j]) * Q * H = P_1^5.C \right) \right), \end{aligned}$$

где:  $H$  – доля содержание твердого в потоке.

Ограничения вида:  $x \rightarrow (\sum_i^n (A_i * B_i) \Delta C)$ , где  $\Delta = \{=, <, >, \leq, \geq, \neq\}$ , а  $C$  – константа, для представления в виде глобальных ограничений разбиваются на два:

$$y \leftrightarrow (\sum_i^n (A_i * B_i) \Delta C); x \rightarrow y.$$

Первое выражение представляется с помощью двух глобальных ограничений: *scalar* и ограничения *reified*, которое ставит в соответствие глобальному ограничению *scalar* булеву переменную. Второе выражение представляется в виде строки smart-таблицы *D*-типа [9] и обрабатывается совместно с другими аналогичными ограничениями в составе единого глобального ограничения.

Решение представленной задачи структурного синтеза представляет собой присваивание значений всем переменным задачи, действующим в ограничениях, которое удовлетворяет всем ограничениям. Непротиворечивое означивание всех логических переменных соответствует выбору требуемой структуры технологического процесса.

## Заключение

Интеграция технологий концептуального моделирования технологических процессов и программирования в ограничениях позволило получить новое решение задачи интеллектуального структурного синтеза схем многостадийных технологических процессов. Проблема структурного синтеза на основе ее концептуального описания сводится к задаче удовлетворения ограничений, описывающих условия выбора элементов в концептуальной модели. Предлагаемое решение применимо в различных предметных областях и позволяет решать задачи структурного синтеза с учетом различных ограничений на сочетаемость элементов. Разработанная инструментальная среда поддерживает формализованную постановку задачи синтеза вариантов требуемого технологического процесса. При этом пользователем может быть задан набор ограничений и критерии эффективности. Работа с ограничениями с точки зрения конечного пользователя существенно облегчена за счет типизации элементов концептуальной модели.

## Литература

1. Божко А.Н. Структурный синтез как задача дискретной оптимизации // Электронное научно-техническое издание “Наука и Образование”. 2010. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/158337.html> (дата обращения: 10.09.2021)
2. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. М.: Машиностроение, 1988. 364 с.
3. Анкудинов Г.И. Синтез структуры сложных объектов. Логико-комбинаторный подход. Ленинград: Издательство ЛГУ, 1986. 258 с.
4. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: МГТУ, 2002. 336 с.
5. Петросов Д. А., Бажанов А. Г. Интеллектуальный структурный синтез технологических процессов на основе эволюционных методов и теории сетей Петри // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 41-51.
6. Бржезовский А.В., Жаков В.И., Путилов В.А., Фильчаков В.В. Синтез моделей вычислительного эксперимента. СПб: Наука, 1992. 231 с.
7. Емельянов С.В., Олейник А.Г., Попков Ю.С., Путилов В.А. Информационные технологии регионального управления. М.: Едиториал УРСС, 2004. 400 с.
8. Russel S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd edition. Prentice Hall, 2010. 1132 p.

9. Zuenko A. Representation and Processing of Qualitative Constraints Using a New Type of Smart Tables // Proceedings of the 4th International Conference on Computer Science and Application Engineering (CSAE '20). 2020. N. 45, P. 1-7.
10. Зуенко А.А., Фридман А.Я. Контекстный подход в системах сопровождения открытых моделей предметной области // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. №3. С. 41-51.
11. Bajwa I. S., Bordbar B., Lee M. G., OCL Constraints Generation from Natural Language Specification //14th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference. 2010, P. 204-213.
12. Yap R., Wang W. Generalized Arc Consistency Algorithms for Table Constraints: A Summary of Algorithmic Ideas // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020. P. 13590-13597.
13. Ingmar L., Schulte C. Making Compact-Table Compact // CP 2018, Lecture Notes in Computer Science. 2018. N. 11008, P. 210-218.
14. Audemard G., Lecoutre C., Maamar M. Segmented Tables: An Efficient Modeling Tool for Constraint Reasoning // ECAI 2020. 2020. P. 315-322.
15. Jussien N., Rochart G., Lorca X. Choco documentation. URL: <https://choco-solver.org/docs/> (дата обращения: 10.09.2021)

**Зуенко Александр Анатольевич.** ФИЦ “Кольский научный центр Российской академии наук”, г. Апатиты, Россия. Ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук. Количество печатных работ: более 130 (в т. ч. 2 монографии). Область научных интересов: искусственный интеллект, программирование в ограничениях, моделирование слабо формализованных предметных областей. E-mail: [zuenko@iimm.ru](mailto:zuenko@iimm.ru)

**Олейник Андрей Григорьевич.** ФИЦ “Кольский научный центр Российской академии наук”, г. Апатиты, Россия. Главный научный сотрудник, доктор технических наук. Количество печатных работ: более 200 (в т. ч. 2 монографии). Область научных интересов: методы и системы поддержки принятия решений в слабо формализованных предметных областях. E-mail: [oleynik@iimm.ru](mailto:oleynik@iimm.ru)

**Олейник Юрий Андреевич.** ФИЦ “Кольский научный центр Российской академии наук”, г. Апатиты, Россия. Младший научный сотрудник. Количество печатных работ: более 20. Область научных интересов: программирование в ограничениях, интеллектуальное планирование. E-mail: [yoleynik@iimm.ru](mailto:yoleynik@iimm.ru)

## Integration of Conceptual Modeling and Constraint Programming for the Synthesis of Flowsheets

A. A. Zuenko, A. G. Oleynik, Y. A. Oleynik

Institute for Informatics and Mathematical Modeling — Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” (IIMM KSC RAS), Apatity, Russia

**Abstract.** The information technology for structural synthesis of multistage technological processes schemes is presented. The technology based on the integration of conceptual modeling and constraints programming methods. Relevance of the development is due to the fact that the existing solutions in the field of structural synthesis do not offer means for the formal description of heterogeneous constraints on the of structural elements combination in the formation of the target object. Integration of conceptual modeling and constraints programming methods provides the formalized description, automated accounting and analysis of heterogeneous constraints both on the compatibility of the equipment that implements the process and on efficiency indicators. Technological processes for the mineral processing are considered as an example. Formal structures characterizing both the properties of the processing object and the equipment that implements the process main technological operations are described. Constrains examples on synthesizing structure of the technological process and functional capabilities of the instrumental system that implements the developed technology are briefly described.

**Keywords:** structural synthesis, flowsheet, conceptual modeling, constraint programming, constraint satisfaction problem.

**DOI** 10.14357/20718632220309

## References

1. Bojko A.N. 2010. Strukturnyj sintez kak zadacha diskretnoj optimizacii [Structural synthesis as a discrete optimization problem]. Elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie "Nauka i Obrazovanie" [Electronic scientific and technical publication "Science and Education"]. 9. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/158337.html> (accessed September 10, 2021).
2. Polovinkin A.I. 1988. Osnovy inzhenerenogo tvorchestva [Basics of Engineering Creativity]. Moscow: Mechanical engineering. 364 p.
3. Ankudinov G.I. 1986. Sintez struktury slozhnykh ob'ektov. Logiko-kombinatornyj podhod [Synthesis of the structure of complex objects. Logical-combinatorial approach]. Leningrad: LSU. 258 p.
4. Norenkov I.P. 2000. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya [Basics of computer-aided design]. Moscow: MSTU. 336 p.
5. Petrosov D. A., and A. G. Bazhanov. 2018. Intellektual'nyj strukturnyj sintez tekhnologicheskikh processov na osnove evolyucionnykh metodov i teorii setej Petri [Intelligent structural synthesis of technological processes based on evolutionary methods and the theory of Petri nets]. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika [Bulletin of the South-West State University. Series: Management, computer technology, informatics]. Vol. 8, 2(27):41–51.
6. Brzhezovskij A.V., V.I. Zhakov, V.A. Putilov, and V.V. Fil'chakov. 1992. Sintez modelej vychislitel'nogo eksperimenta [Synthesis of Computational Experiment Models]. SPb: Science. 231 p.
7. Emel'yanov S.V., A.G. Oleynik, Y.S. Popkov, and V.A. Putilov. 2004. Informacionnye tekhnologii regional'nogo upravleniya [Information technologies of regional administration]. Moscow: Editorial URSS. 400 p.
8. Russel S., and P. Norvig. 2010. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd edition. Prentice Hall. 1132 p.
9. Zuenko A. 2020. Representation and Processing of Qualitative Constraints Using a New Type of Smart Tables. Proceedings of the 4th International Conference on Computer Science and Application Engineering (CSAE '20), 45:1–7.
10. Zuenko A.A., and A.Ya. Fridman Kontekstnyj podhod v sistemah soprovozhdeniya otkrytykh modelej predmetnoj oblasti [Contextual approach in support systems for open domain models]. Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij [Artificial Intelligence and Decision Making]. 3:41–51.
11. Bajwa I. S., B. Bordbar B., and M. G. Lee. 2010. OCL Constraints Generation from Natural Language Specification. 14th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference. 204–213.
12. Yap R., and W. Wang. 2020. Generalized Arc Consistency Algorithms for Table Constraints: A Summary of Algorithmic Ideas. AAAI 2020. 13590–13597.
13. Ingmar L. and C. Schulte. 2018. Making Compact-Table Compact. CP 2018, Lecture Notes in Computer Science. 11008:210–218.
14. Audemard G., C. Lecoutre, and M. Maamar. 2020. Segmented Tables: An Efficient Modeling Tool for Constraint Reasoning. ECAI 2020. 315–322.
15. Jussien N., G. Rochart, and X. Lorca. Choco documentation. Available at: <https://choco-solver.org/docs/> (accessed September 10, 2021)

**Zuenko A. A.** Leading researcher, PhD, Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", 24A Fersman str., Apatity, 184209, Russia, e-mail: [zuenko@iimm.ru](mailto:zuenko@iimm.ru)

**Oleynik A. G.** Chief Researcher, D of Sc, Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", 24A Fersman str., Apatity, 184209, Russia, e-mail: [oleynik@iimm.ru](mailto:oleynik@iimm.ru)

**Oleynik Y. A.** Junior researcher, Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", 24A Fersman str., Apatity, 184209, Russia, e-mail: [yoleynik@iimm.ru](mailto:yoleynik@iimm.ru)