

Совершенствование технологического процесса изготовления емкостного оборудования на машиностроительных предприятиях с заказным характером производства на основе автоматизации оптимального раскроя листового сортамента

Кульга К. С., д-р техн. наук, Меньшиков П. В., аспирант, Давлетшин Р. Ф., магистрант (Уфимский государственный авиационный технический университет)

Рассмотрены результаты совершенствования технологического процесса изготовления корпусных деталей емкостного оборудования (обечайки) на основе создания и практической апробации на предприятиях нефтяного машиностроения алгоритмического и программного обеспечения (ПО) автоматизированной информационной системы (АИС) оптимального раскроя листового сортамента, включая решение задачи программной интеграции на уровне данных и управления с ПО интегрированной АИС Stalker PLM [1].

Актуальность проблемы. Одной из основных и дорогостоящих корпусных элементов емкостного оборудования, на которую приходится значительная часть затрат времени технической подготовки производства нефтяного и химического машиностроения, является деталь, имеющая наименование «обечайка». Обечайка – открытый с торцов цилиндрический или конический барабан (без днищ), являющийся заготовкой для паровых котлов, баков, резервуаров и т.п. листовых металлоконструкций. Актуальной является решение научной задачи совершенствования технологического процесса изготовления обечайки, повышение точности раскроя дорогостоящих материалов, рационального использования деловых отходов.

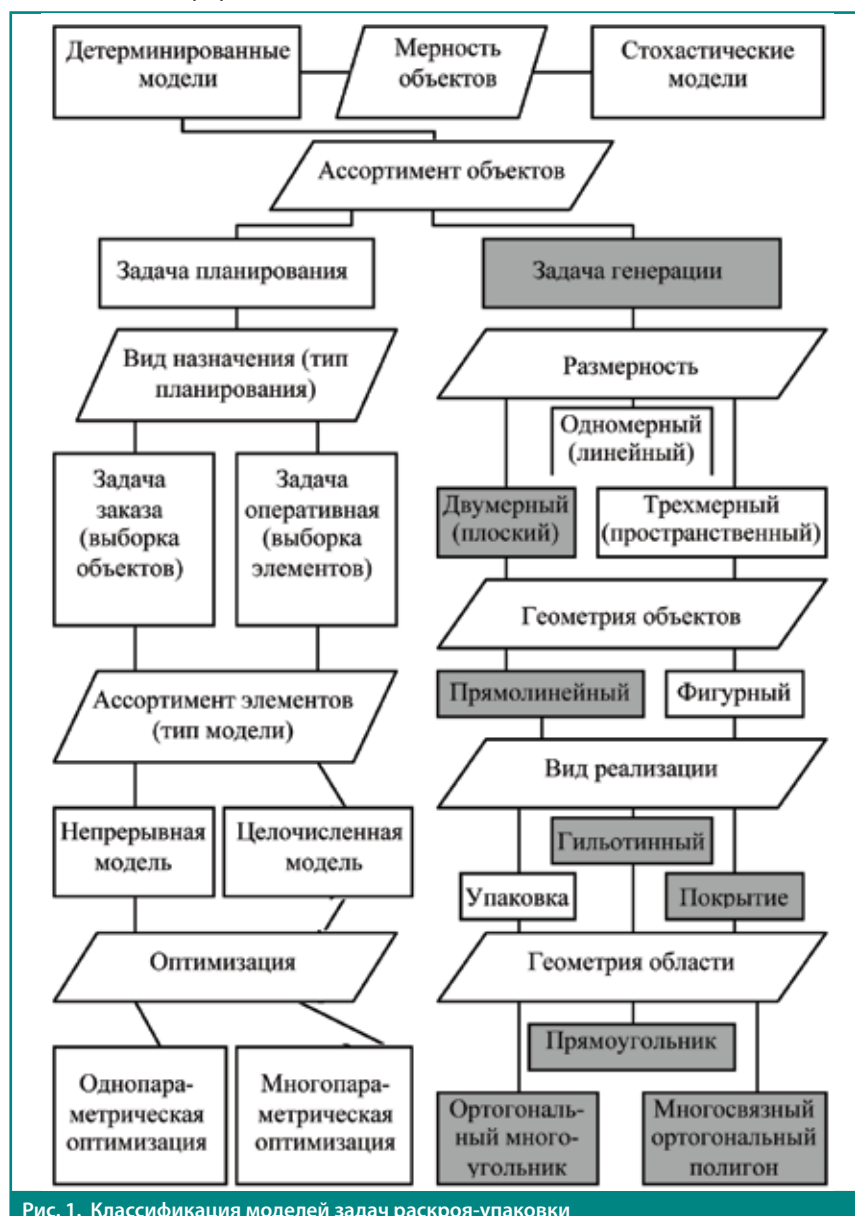


Рис. 1. Классификация моделей задач раскроя-упаковки

Цель научного исследования: совершенствование технологического процесса изготовления обечайки на основе создания и практической апробации на предприятиях нефтяного машиностроения автоматизированной информационной системы (АИС) оптимального раскроя листового сортамента, включая решение задачи программной интеграции на уровне данных и управления с программным обеспечением (ПО) интегрированной АИС (ИАИС) Stalker PLM [1].

Для достижения цели работы были сформулированы и решены следующие **научные задачи:**

1. Изучены известные технологии и алгоритмы покрытия многоугольных фигур прямоугольниками и рассмотреть возможность их применения для решения задачи оптимального раскроя листового сортамента; исследовать технические и технологические особенности задачи раскроя обечайки.

1.1. Модели и методы решения задач плотного размещения предметов. Под задачами плотного размещения понимается широкий класс проблем, объединенных однообразной логической структурой и допускающих различное толкование. Данной задаче эквивалентны возникшие много раньше задачи раскроя и упаковки (Cutting and Packing, C&P), которые в течение последних пятидесяти лет привлекают внимание научных исследователей и производственников. Начало этому положил в 1939 г. Канторович Л. В. [2]. Он рассматривал задачу получения максимального числа комплектов деталей в заданном ассортименте-

ном отношении. Для её решения был предложен метод решающих множителей, который предвосхитил появившееся позднее линейное программирование. Тогда Канторович Л. В. применил непрерывную релаксацию к решению целочисленной задачи раскроя. Метод был описан Канторовичем Л. В. и Залгаллером В. А. в 1951 г. (1971 г.) [2]. Различные вычислительные схемы (сеточный метод и метод склейки) были разработаны и исследованы Мухачевой Э. А. и Романовским И. В. [3]. По сути, классическая проблема массового раскроя оказалась закрытой. М. Гэри и Д. Джонсон доказали, что целочисленная задача одномерного раскроя является **NP**-трудной [4]. А это, в свою очередь, означает, что целочисленная проблема гильотинного размещения является **NP**-трудной в сильном смысле. Для решения таких задач используется полный перебор, а точных алгоритмов полиномиальной сложности пока не известно. Поэтому стали бурно развиваться приближенные и эвристические методы, в том числе и мета-эвристики.

1.2. Задачи раскроя и упаковки. К проблемам раскроя и упаковки можно отнести следующие задачи, показанные на рис. 1. Задачи могут различаться геометрией области и размещаемых в него предметов, размерностью, условиями реализации размещения и другими дополнительными факторами. Факторы и порождаемые ими задачи изображены на рис. 1. Серым цветом отмечены задачи, составляющие предмет исследования или близкие к нему.

3.3. Одномерные задачи раскроя и упаковки. Одномерные задачи – основная категория проблем **C&P**. Среди них можно выделить следующие три типа: задача загрузки рюкзака, задача раскроя и задача упаковки.

1.4. Задачи прямоугольной упаковки. В качестве основной принято рассматривать следующую задачу упаковки (Packing Problem, **PP**): имеются малые элементы, их необходимо разместить без взаимного перекрытия внутри больших объектов так, чтобы заданная целевая функция достигла минимума (максимума). В категории «задач раскроя и упаковки» содержится множество прикладных задач, которые изучаются с давних пор. Большая часть таких задач являются **NP**-трудными комбинаторными проблемами и для них не известны точные методы решения полиномиальной сложности. М. Гэри и Д. Джонсон показали, что более простые, чем рассматриваемые задачи, принадлежат к классу **NP**-трудных проблем [4].

1.5. Постановки задач покрытия. Задача размещения в области с препятствиями может быть сведена к задаче размещения предметов в прямоугольные контейнеры путем выделения последних из исходной области. Такую проблему можно отнести к классу задач покрытия. Наиболее общей задачей покрытия является задача о минимальном покрытии множества. Все остальные задачи являются подклассами этих задач. Специфика конкретных задач состоит в структуре покрывающих и покрываемых множеств, а также в выборе критериев оптимизации. Задача минимального покрытия множества является **NP**-трудной, как и большинство других представителей задач покрытия.

2. Разработка алгоритмического и ПО АИС оптимального раскроя обечайки

2.1. Постановка задачи оптимального раскроя обечайки. Оптимальный раскрой листового сортамента для изготовления обечайки в общем случае сводится к задаче покрытия ортогональной области с препятствиями прямоугольниками заданных размеров. При больших размерностях задач, в связи с большими затратами вычислительных ресурсов сов-

ременных ЭВМ, для решения практических задач раскроя целесообразно использовать эвристические методы поиска оптимального решения. В отличие от классической постановки задачи покрытия ортогональной области с препятствиями, задача оптимального раскроя обечайки имеет ряд особенностей, связанных с учетом следующих ограничений (критериев):

- применение групп сосудов, включающих обечайку, имеющих различные технологические требования (ГОСТ Р 52630-2006 «Сосуды и аппараты стальные сварные». Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2007);
- учет точности технологического оборудования, ширину сварных швов и их взаимное расположение (например, не допускаются крестообразные швы, или параллельные швы, расстояние между которыми меньше определенного Δ_{\min});
- особенности конструкции обечайки, в которую входят следующие детали/сборочные единицы (ДСЕ): штуцеры, люки, цапфы, опоры, укрепляющие кольца, тарелки и др. Для каждой ДСЕ существует свой набор технологических ограничений на расположения сварных швов;
- тип заготовки (лист или лента) и учет ее параметров (кромление листа, направление волокон и др.);
- количество использованных листов, общую длину различных типов сварных швов (полученных разными видами сварки), количество деловых и технологических отходов заготовки, трудоемкость технологических операций, значение плановой себестоимости корпусной детали.

Исследование возможностей существующих программ, применение которых возможно для задачи оптимального раскроя обечайки, показал, что они не учитывают всех вышеперечисленных критериев, предъявляемых к решению поставленной задачи предприятиями нефтяного машиностроения. В настоящее время на не автоматизированное решение задачи раскроя обечайки затрачивается от 2 до 4 дней (по данным фотографии дня работы инженера-технолога), при этом не гарантируется оптимальность полученного решения и отсутствия ошибок.

2.2. Разработка алгоритмического и ПО АИС оптимального раскроя обечайки. Разработка ПО АИС осуществлялась с использованием инструментальных средств CASE-технологий, а именно методологии разработки ПО Rational Unified Process (RUP) и универсального языка моделирования UML.

ПО АИС включает три основных модуля [5]:

- 1. Препроцессор** – ПО интерактивного графического редактора для создания геометрической модели обечайки (включая генерацию параметрической 3D твердотельной геометрической модели в САД-системе на основе ПО API-функций этих системы);
- 2. Процессор** – ПО оптимального раскроя обечайки на основе реализации эвристического алгоритма;
- 3. Постпроцессор** – ПО графической визуализации и печати результатов оптимального раскроя обечайки (автоматическая генерация карты раскроя в виде 2D/3D геометрической модели в САД-системе на основе ПО API-функций) и формирования управляющей программы для технологического оборудования с ЧПУ;

Препроцессор АИС. Рассмотрим подробнее ПО препроцессора АИС. Главная форма препроцессора АИС показана на рис. 2.

В препроцессоре, на основе конструкторской документации, создается 2D геометрическая модель обечайки. Для повышения эффективности создания вышеуказанной модели

разработана параметрическая библиотека геометрических объектов обечайки: штуцеры, люки, цапфы, сварные швы, опоры и др. Задание координат расположения объектов возможно не только от начала координат, но и от любых других объектов или заданных пользователем базовых поверхностей. Таким образом, нет необходимости выполнять трудоемкие расчеты для размещения объектов в геометрической модели обечайки.

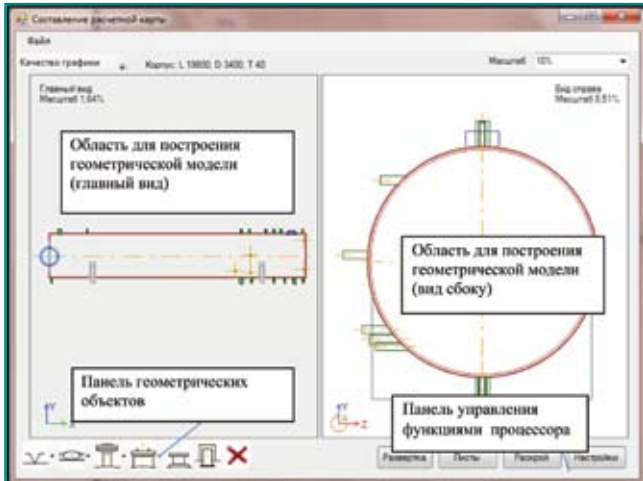


Рис. 2. Основное окно модуля препроцессора АИС

Пример создания геометрической модели обечайки на основе использования библиотеки параметрических объектов показан на рис. 3.

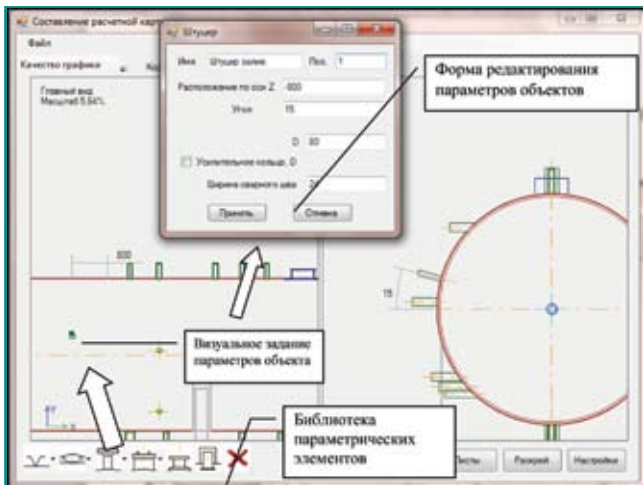


Рис. 3. 2D-геометрическая модель обечайки в препроцессоре АИС

После создания геометрической модели обечайки, осуществляется дополнительная проверка правильности ее построения. Для этого в состав препроцессора входит ПО функции автоматического построения 3D геометрической модели обечайки в CAD-системе Solid Works.

Процессор АИС. После проверки правильности построения геометрической модели обечайки, управление передается в ПО процессора АИС, где определяются граничные условия раскроя, и осуществляется формирование расчетной схемы обечайки в виде развертки (рис. 4).

ПО модуля процессора АИС осуществляет решение задачи оптимального раскроя обечайки на основе эвристического алгоритма, в котором реализованы следующие особенности [5]:

- итерационный последовательный перебор возможных вариантов с ранним отсеком заведомо неудачных вариантов раскроя;
- использование сущностей «запрещенная зона» и «узлов-

вая точка» для быстрого поиска возможных вариантов размещения заготовки (листа);

- реализация процедуры поиска в области вокруг локального оптимума на каждой итерации, что позволяет повысить вероятность нахождения оптимального решения;
- возможность в случае необходимости разрезания заготовки (листа), формирования и применение «прикройных» заготовок (листов);
- использования деловых отходов для новых сеансов раскроя обечайки с высоким приоритетом размещения объектов;
- решение обратной задачи раскроя - определение размеров заготовок (листа), обеспечивающих оптимальные значения критериев целевой функции.

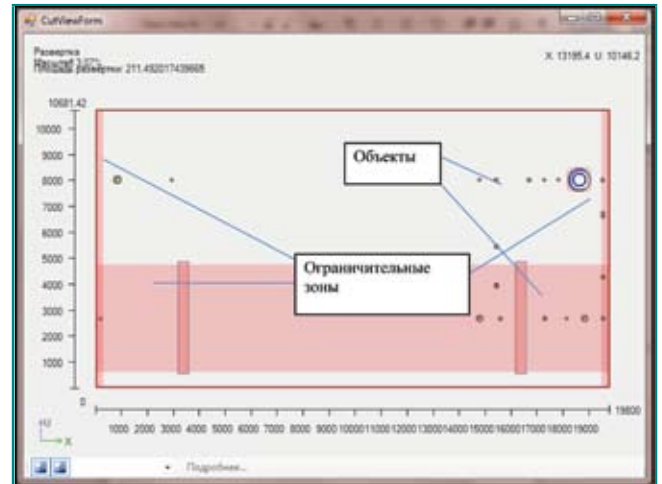


Рис. 4. Развертка обечайки

На развертке показаны контуры объектов (с учетом их искажений при проецировании на цилиндрическую поверхность обечайки) и ограничительные зоны (см. рис. 4). Например, согласно регламентным документам, на изготовление корпусных деталей, можно выделяются ограничительные зоны запретов на расположение кольцевых и продольных сварных швов. Отбор финальных и раннее отсеком неудачных вариантов производится в соответствии со значением целевой функции (критерия оптимальности), которая имеет вид:

$$F_r = \sum F_i \cdot K_i$$

где F_i – i-ый критерий целевой функции;

K_i – весовой коэффициент для i-го критерия.

Постпроцессор АИС. Результаты оптимального раскроя визуализируются в постпроцессоре АИС. Кроме того, постпроцессор АИС осуществляет вывод на печать карт раскроя обечайки в виде 2D и 3D геометрической модели. Результаты работы постпроцессора АИС показаны на рис. 5 - 6.

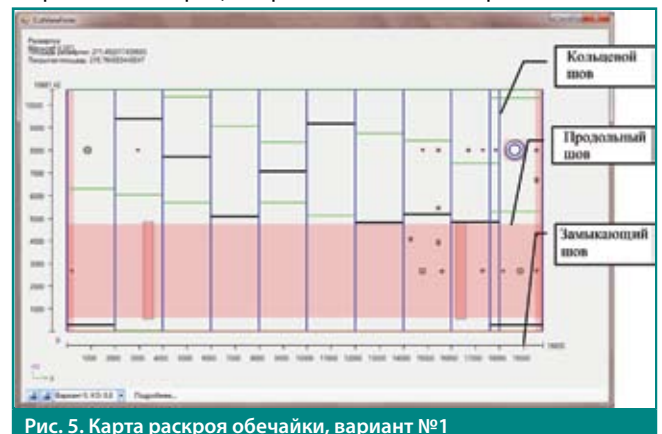


Рис. 5. Карта раскроя обечайки, вариант №1

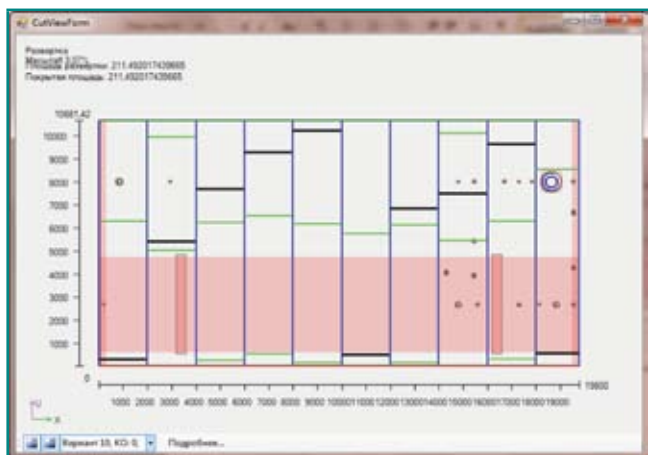


Рис. 6. Карта раскроя обечайки, вариант №2

Постпроцессор позволяет проанализировать на форме «Результаты раскроя» (рис. 7) значение целевой функции и ее критериев для каждого варианта раскроя обечайки. Результаты анализа вариантов раскроя обечаек (варианты №1 и №2), приведенных выше, показаны на рис. 7.

№1 – первый вариант раскроя; №2 – второй вариант раскроя.

Критерий	Значение
Целевая функция	0,78014105209089
Количество использованных листов	20
Коэффициент по площади	0,98019801980198
Суммарная длина кольцевых швов	36132,7381988477
Коэффициент по кольцевым швам	0,111111111111111
Суммарная длина продольных швов	54400
Коэффициент по продольным швам	0,362875984235294

Критерий	Значение
Целевая функция	0,780514096185738
Количество использованных листов	20
Коэффициент по площади	1
Суммарная длина кольцевых швов	36132,7381988477
Коэффициент по кольцевым швам	0,111111111111111
Суммарная длина продольных швов	53600
Коэффициент по продольным швам	0,363462988574627

Рис. 7. Форма «Результаты раскроя»

Из рисунка 7 видно, что у варианта раскроя №2 обечайки значение целевой функции выше – 0,780 против 0,769, что объясняется следующим:

- более оптимальным покрытием листовой заготовкой детали обечайка: коэффициент по площади 1 против 0,98 у варианта №1;
- меньшей суммарной длиной продольных сварных швов детали обечайка: 53600 мм против 54400 мм.

Таким образом, вариант карты раскроя №2, с точки зрения плановой себестоимости изготовления обечайки, является более оптимальным.

Рассмотрим еще одну из функций разработанного ПО постпроцессора - автоматическое построение параметрической твердотельной 3D-модели карты раскроя обечайки в CAD-системе SolidWorks на основе прикладного ПО API (Application Programming Interface - интерфейс прикладного программирования)-функций вышеуказанной CAD-системы (рис. 8).

Данная функция постпроцессора АИС позволяет наглядно, до изготовления дорогостоящей корпусной детали емкостного аппарата, проверить и сравнить результаты расчетов, а также сформировать управляющую программу для технологического оборудования с ЧПУ.

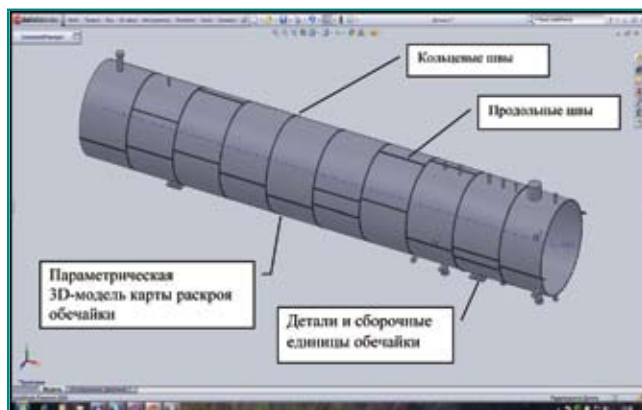


Рис. 8. Твердотельная параметрическая 3D-модель карты раскроя обечайки

Основные выводы и результаты

1. Изучены известные технологии и алгоритмы покрытия многоугольных фигур прямоугольниками и рассмотрена возможность их применения для решения задачи оптимального раскроя листового сортамента; исследованы технические и технологические особенности задачи раскроя обечайки;
2. Разработан эффективный эвристический алгоритм для решения задач раскроя листового сортамента с учетом технологических требований производства;
3. Разработано ПО АИС оптимального раскроя листового сортамента для совершенствования технологического процесса изготовления корпусных деталей емкостного оборудования на предприятиях нефтяного машиностроения.
4. С помощью разработанного ПО проведены экспериментальные расчеты корпусной детали емкостного аппарата (сепаратор), сформированы карты раскроя обечайки. Определен сводный критерий оптимальности раскроя и значения весовых коэффициентов, позволяющие анализировать результаты расчетов раскроя до изготовления емкостного аппарата. Реализована функция формирования управляющей программы заготовительных операций для технологического оборудования с ЧПУ.
5. ПО АИС оптимального раскроя обечайки входит в состав ИАИС Stalker PLM [1], предназначенной для автоматизации технической подготовки и оперативного управления производством в едином информационном пространстве машиностроительного предприятия.

Список литературы

1. Кульга К. С. Внедрение информационных технологий жизненного цикла изделий в машиностроении // Инструменты. Технология. Оборудование. М.: 2009. №9. С.38–42.
2. Канторович Л. В., Залгаллер В. А. Рациональный раскрой промышленных материалов // Новосибирск: Наука СО. 1971. 299 с.
3. Мухачева Э. А. Рациональный раскрой промышленных материалов. Применение в АСУ // -М.: Машиностроение. 1984. 176 с.
4. Гери М., Джонсон Д. Вычислительные машины и трудноразрешимые задачи // -М.: Мир, 1979. 416с.
5. Кульга К. С., Меньшиков П. В. . Совершенствование технологического процесса изготовления емкостного оборудования на основе автоматизации оптимального раскроя. Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: Межвузовский научный сборник всероссийской научно-технической конференции. Уфа: Изд. УГАТУ, 2011. С.132-137.



Уважаемые читатели!

Предлагаем Вам подписаться
на «Комплект: ИТО»
на первое полугодие 2013 года

Подписаться можно в любом почтовом отделении

по объединенному каталогу

«ПРЕССА РОССИИ»

Цена на 6 месяцев – 2442 рублей!
(см. каталог <http://www.pressa-rf.ru/cat/1/indx/42049/>)

Цена на 12 месяцев – _____ рублей! (см. каталог)

индекс **42049**

Для оформления подписки в почтовом отделении можно вырезать и заполнить данную форму

Ф. СП-1		АБОНЕМЕНТ на газету 42049 <small>журнал</small> (индекс издания)									
«Комплект: ИТО»		Количество комплектов:									
на 2013 год по		месяц а м:									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Куда		(почтовый индекс)		(адрес)							
Кому		(фамилия, инициалы)									
ПВ		место		ли-тер		ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА					
						на газету 42049 <small>журнал</small> (индекс издания)					
						«Комплект: ИТО»					
Стои-мость	подписки	руб.	коп.	Количество комплектов							
	переадресовки	руб.	коп.								
на 2013 год по		месяц а м									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Куда		(почтовый индекс)		(адрес)							
Кому		(фамилия, инициалы)									

ООО «Инструменты. Техно логия. Оборудование»
107023, РФ, Москва, ул. Б. Семеновская, д. 49, оф. 334
Тел./факс: +7 (095) 366-98-00, 369-57-08
e-mail: exp@ito-baza.ru; www.ito-news.ru

