

ПЛАНИРОВАНИЕ И ПОСТРОЕНИЕ РАСПИСАНИЙ РАБОТ НА ЗАВОДАХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

А.О. Рыжиков, А.С. Фирсов (МГТУ им. Н.Э. Баумана),
Е.Н. Хоботов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИПУ РАН)

Рассматривается специфика задач планирования и построения производственных расписаний, свойственная заводам железобетонных изделий (ЖБИ). Излагаются принципы создания системы планирования и построения производственных расписаний для таких заводов. Описываются принципы работы соответствующих алгоритмов.

Ключевые слова: модели, планирование, управление, теория расписаний, оптимизация, сборка, механообработка.

Введение

В настоящее время перед большинством отечественных и зарубежных производственных предприятий достаточно остро стоит вопрос планирования работ по выпуску готовой продукции и оптимизации складских запасов материалов, сырья и готовой продукции в зависимости от имеющегося спроса и долгосрочных заказов постоянных покупателей. Важным примером таких предприятий являются заводы по выпуску железобетонных изделий.

Методы управления и планирования работ на предприятиях во многих случаях позволяют значительно сокращать сроки выполнения работ и заказов за счет более рационального использования оборудования и тем самым повышать эффективность работы соответствующих производств. Однако производство изделий на заводах ЖБИ обладает рядом специфических особенностей и в связи с этим для построения планов и расписаний работ на этих заводах необходима разработка специализированных методов, учитывающих специфику и особенности производства такой продукции.

Рассмотрим принципы создания и структуру системы управления и планирования работ на заводе по выпуску ЖБИ, в состав которого может входить несколько производственных участков, склады сырья и готовой продукции. Описываются структура системы, а также принципы работы алгоритмов календарного планирования и построения расписания работ.

Постановка задачи

На заводе ЖБИ производятся десятки типов изделий. Имеются несколько производственных участков и подразделений, которые выполняют определенные виды работ.

На заготовительном участке из арматуры соответствующего типа нарезаются и производятся заготовки, из которых собираются каркасы для изготовления готовой продукции. Заготовки производятся из материалов, хранящихся на складе. Материалы доставляются на завод не ранее чем через две недели с момента заказа. Обычно за одну доставку на завод поставляется группа сырья и материалов, которых хватает на 2...3 недели работы предприятия.

На растворобетонном узле из песка, щебня, цемента, воды и добавок готовится бетон соответствующих марок для заливки форм будущих изделий. Для приготовления бетона используется одна или несколько

установок, в которых могут готовиться разные марки бетона.

Приготовленный бетон поступает в специальные ковши, которые после заполнения бетоном направляют в формовочный цех для заполнения расставленных там форм изделий. После заполнения форм в течение заданного для каждого изделия времени происходит набор определенной твердости изделия. Набравшие достаточную твердость изделия извлекаются из форм и поступают на склад готовой продукции для набора окончательной твердости и ожидания отправки заказчиком.

Установки для смешения бетона и ковши для заливки приготовленного бетона в формы перед окончанием работы производства должны быть освобождены от бетона и промыты. Поэтому количество готовящегося бетона надо рассчитывать с учетом этого условия.

Все компоненты для приготовления бетона хранятся на складе сырья и материалов и должны пополняться в соответствии с планами работ и поступившими заказами на готовую продукцию.

В формовочном цехе имеются вибростолы, участки изготовления специальных изделий таких, например, как столбы освещения, колодезные кольца, а также площади, на которых могут устанавливаться формы изделий. Для каждого изделия известна технология производства, в том числе возможность установки формы изделия на вибростолах. Существуют изделия, которые могут изготавливаться как на вибростолах, так и на площадях цеха. Однако имеются изделия, которые нельзя изготавливать на вибростолах, а формы для их заливки могут размещаться только на площадях формовочного цеха. В формовочном цехе с использованием различных видов вибраций (вибростолы и мобильные погружные вибраторы) производится устранение воздушных пузырей и полостей в изделии, а также осуществляется окончательная усадка бетона, залитого в форму будущего изделия.

На участке обрезки продукции удаляются лишние элементы изделия (бетона) и производится предварительная проверка качества изделия и отбраковка негодных изделий.

В отделе технического контроля производится основная проверка и отбраковка негодной продукции. Прошедшая проверку продукция поступает на доработку, если брак исправимый или сразу поступа-

ет на склад готовой продукции. Некоторые изделия с неисправимым браком могут быть реализованы со склада готовой продукции по сниженным ценам.

На складе готовой продукции учитывается и регистрируется поступившая продукция, формируются комплекты продукции для отправки конкретным потребителям в соответствии с их заказами, а также формируются отчеты об отправке продукции по заказам.

На складе форм хранятся формы для производства всей производимой продукции. В соответствии с планами работ подбираются формы, которые будут использованы в ближайшее время для производства продукции. Производится проверка их готовности и установка к началу работ на соответствующие места в формовочном цехе для производства продукции.

В отделе планирования на основе поступивших заказов формируются сменно-суточные задания на каждое рабочее место и назначаются рабочие для обслуживания производственного оборудования. Для выполнения этих заданий формируются заявки на заготовительный участок для подготовки необходимых заготовок, каркасов и материалов, на склады форм с требованиями о подготовке и выдаче нужных форм, на растворобетонный узел с требованиями подготовки необходимого количества бетона нужных марок. На участок формовки направляются заявки с требованиями расстановки заказанных форм на вибростолы и места формовки. Все заявки должны направляться с учетом времени, необходимого для их исполнения. В этом отделе также формируются отчеты о затраченном сырье и материалах, производятся заказы на закупку сырья и материалов, которые должны быть сформированы и сделаны как минимум за две недели до срока поставок. Кроме того, производится диспетчеризация производства, то есть перепланирование работ на заводе в случае возникновения поломок оборудования, появления срочных заказов, возникновения брака, отмены некоторых заказов и т. д.

Все работы в отделе планирования, в том числе по формированию сменно-суточных заданий, размещению форм на вибростолы и места формовки и диспетчеризации производства, производятся вручную, являются достаточно трудоемкими, занимают значительное время и не всегда позволяют получать желаемые, а часто даже и приемлемые результаты.

Такая специфика производства изделий и управления им требует создания АСУ и существенной модернизации известных методов построения расписаний работ и разработки специальных методов, ориентированных на решение таких задач.

В связи с этим для улучшения качества управления и повышения эффективности работ на заводе ЖБИ предлагается создать автоматизированную систему, в которой хранилась бы информация об изготавливаемых изделиях, поступивших заказах, наличии сырья на складах, а также обеспечивалась бы возможность планировать деятельность производственных участ-

ков завода и строить расписание выполняемых работ. Построение расписаний выполняемых работ представляется весьма важным и актуальным, поскольку без формирования и анализа последовательности выполняемых работ возможны сбои производства, связанные как с ожиданием требуемого типа и количества бетона, так и с необходимостью его срочного использования или даже утилизации, если марка имеющегося бетона окажется непригодной для подготовленных работ. Кроме того, создаваемая система на основе построенных планов должна формировать заявки на подготовку к заданным моментам времени заготовок из арматуры, заявки на смешение нужного количества и качества бетона, заявки на закупки сырья, подготовку требуемых форм и арматуры и подготовку отчетов по состоянию производства и выполнению производственных заказов. Для выполнения этих работ система должна быть наделена специальными модулями, построенными на основе средств и методов предложенных в [1–3].

Структура системы планирования работ для предприятия

Рассмотрим структуру и принципы построения системы планирования работ, которая позволила бы решать описанные выше задачи, а также назначение составляющих ее программных модулей и организацию их взаимодействия.

Систему предлагается строить по клиент-серверной архитектуре с единой БД и включить в нее следующие программные модули: ввода исходных данных, планирования и построения расписаний работ, формирования заданий на производственные участки, диспетчеризации производства и формирования отчетов.

Модуль ввода исходных данных

Предприятия, на управление которыми ориентирована данная система, работают как по выполнению заказов клиентов, так и по производству типовой продукции, которая реализуется со склада в соответствии с имеющимся на рынке спросом. Заказы клиентов обычно состоят из продукции, которую предприятие уже изготавливало, но иногда появляются новые изделия, для изготовления которых требуется разработка специальных форм и технологии производства.

В связи с этим в БД системы хранится перечень производимой продукции, информация о наименовании и шифре изделия, о габаритах и размерах изделия, о технологии изготовления (используемая марка бетона, чертежи арматурного каркаса изделия, наименование формы для изготовления, режимы изготовления, характеристики качества, количество требуемого бетона).

На основе информации о поступивших заказах и прогнозов спроса на типовые изделия формируется «портфель заказов», для выполнения которого строится объемный план работ, обычно по месяцам. По сформированному месячному плану работ строится календарный план работ предприятия.

Подобные модули реализованы практически во всех информационных системах, поэтому подробно их рассматривать не будем.

Модуль планирования и построения расписаний работ

Основным модулем данной системы является модуль планирования и построения расписания работ предприятия. На основе работы этого модуля организуется функционирование остальных модулей системы.

Завод ЖБИ, на управление которым ориентирована предлагаемая система, работает по выполнению заказов клиентов и по удовлетворению спроса, имеющегося на рынке на типовую продукцию, производимую предприятием.

Использование традиционных методов планирования и построения расписаний работ [4–7] для формирования планов и расписаний работ завода ЖБИ, к сожалению, вызывает значительные затруднения. Это связано с особенностями производства продукции на этих заводах. Изделия на заводах ЖБИ изготавливаются путем заливки бетона определенной марки в соответствующие формы, которые размещаются на вибростолах и площадях формовочного цеха и остаются там до набора изделием заданной твердости.

Для повышения производительности производства и сокращения времени выполнения объемных планов, изделия из плановых заданий целесообразно распределять по группам таким образом, чтобы формы изделий каждой группы занимали как можно большую площадь на вибростолах и площадях формовочного цеха. Кроме того, по технологии производства часть изделий не может размещаться на вибростолах, а часть изделий может размещаться и на вибростолах, и в местах формовки. Для некоторых изделий часто задаются желательные сроки готовности, а иногда и устанавливают «жесткие» директивные сроки готовности, которые следует также учитывать при распределении изделий по группам.

Для учета важности и необходимости более раннего изготовления некоторых изделий, а также желательных и директивных сроков их изготовления назначаются коэффициенты, определяющие приоритет каждого изделия, который учитывается при включении изделия в группу.

В формируемую группу целесообразно включать изделия, которые могут быть размещены на вибростолах и площадях формовочного цеха и при этом имеют более высокий суммарный приоритет, чем при включении в группу других неразмещенных изделий, то есть изделий, которые не принадлежат к ранее сформированным группам изделий. Более подробно алгоритм формирования групп изделий будет рассмотрен далее.

Все работы на участке формовки должны быть согласованы с работами на растворобетонном узле и заготовительном участке, поскольку приготовленный бетон может храниться ограниченное время. Объемы приготовленного бетона должны быть точно просчи-

таны, поскольку стоимость неиспользованного бетона высокая, а утилизация его остатков дорогая и требует специальных мероприятий.

Поэтому для построения приемлемых планов и расписаний работ на заводах ЖБИ необходима разработка специализированных методов построения расписаний, в которых будет учитываться специфика производства и требования, связанные с технологией изготовления таких изделий.

Рассмотрим алгоритм, позволяющий строить расписания работ на заводе ЖБИ, в котором согласуются планы работ на различных участках производства. Предлагаемый алгоритм строится в соответствии с принципами, изложенными в [1–2] и по шагам может быть представлен в следующем виде.

Шаг 1. Производится проверка окончания работы алгоритма. Если все изделия из планового задания распределены по группам, и все изделия каждой группы размещены по вибростолам и местам формовки, то следует переход к шагу 4 данного алгоритма. В противном случае следует переход к шагу 2.

Шаг 2. Производится формирование новой группы из еще не включенных в другие группы изделий. Для этого с использованием алгоритмов размещения, один из которых рассматривается далее, строится несколько вариантов размещения (при разных параметрах алгоритма), из которых выбирается лучшее, например, имеющее более высокий суммарный приоритет размещенных изделий и меньшую незанятую площадь вибростолов и мест формовки. Возможны и другие правила и критерии, по которым выбирается лучшее размещение.

Шаг 3. Сформированной группе присваивается номер и в БД запоминаются изделия, включенные в эту группу с координатами размещения их форм по вибростолам и местам формовки цеха. Запоминается также суммарный приоритет размещенных изделий и незанятая площадь вибростолов и мест формовки изделиями группы. Размещенные изделия исключаются из оставшихся в «портфеле заказов» изделий. Следует переход к шагу 1 данного алгоритма.

Шаг 4. Формируется последовательность изготовления сформированных групп изделий по убыванию суммарного приоритета изделий, включенных в группу. Сначала изготавливаются группы, имеющие наибольший суммарный приоритет изделий группы, затем меньший и т.д. Для каждой группы изделий сохраняются координаты мест размещения формы каждого изделия из группы по вибростолам и местам формовки. Вычисления прекращаются.

Размещение изделий группы по вибростолам и местам формовки является непростой задачей и требует разработки специальных алгоритмов. Рассмотрим сначала задачу размещения форм для изготовления изделий на вибростоле, которая формулируется следующим образом.

Пусть задан вибростол, имеющий ширину W и длину L . На этом вибростоле требуется разместить

формы изделий, принадлежащих множеству I , которое определяет изделия из поступивших на размещение и пригодных для изготовления на вибростоле.

Форму изделия любого типа с точки зрения размещения на вибростоле можно рассматривать, как прямоугольную. Пусть i -я форма имеет длину l_i , ширину w_i , а изделие, которое будет изготавливаться в этой форме, имеет приоритет β_i .

Введем прямоугольную систему координат $ХОУ$, у которой оси $ОХ$ и $ОУ$ совпадают соответственно с нижней стороной вибростола, имеющей длину L , и боковой стороной, имеющей ширину W .

Решение задачи представляется в виде набора элементов $i \in \tilde{I}$, где $\tilde{I}$ — множество форм изделий ($\tilde{I} \subset I$), которые могут быть размещены на вибростоле, с указанием положения размещения каждой формы. Размещение форм изделий на вибростоле удобно задавать с помощью координат (x_i, y_i) нижнего левого угла прямоугольника, определяющего форму изделия, соответственно по осям X и Y . Назовем набор элементов $i \in \tilde{I} \subset I$ допустимой прямоугольной упаковкой, если выполнены следующие условия.

1. Стороны прямоугольников, соответствующих формам изделий, параллельны граням вибростола (условие ортогональности).

2. Прямоугольники, соответствующих формам изделий, не должны перекрывать друг друга для всех $j \neq i$, $j, i = 1, \dots, m$, что обеспечивается выполнением условий [8–9]:

$$\left((x_i \geq x_j + l_j) \vee (x_j \geq x_i + l_i) \right) \vee \\ \vee \left((y_i \geq y_j + w_j) \vee (y_j \geq y_i + w_i) \right).$$

3. Прямоугольники, соответствующие формам изделий, не должны выходить за границы вибростола для всех $i = 1, \dots, m$, что гарантируется выполнением условий [8–9]:

$$(x_i \geq 0) \vee (y_i \geq 0) \vee (x_i + l_i \leq L) \vee \\ \vee (y_i + w_i \leq W).$$

При выполнении этих условий требуется найти такое размещение форм изделий на вибростоле, которое минимизирует или максимизирует заданный критерий, когда формы всех изделий на вибростоле уместиться не могут. В качестве критериев размещения может быть выбран, например, критерий, в котором требуется максимизировать суммарный приоритет размещенных форм изделий, или критерий, в котором минимизируется незанятая площадь вибростола. Кроме того, в некоторых случаях выбирается линейная свертка этих критериев:

$$J = \max \{ \alpha_1 F_1 - \alpha_2 F_2 \}, \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1,$$

где α_1 и α_2 — весовые коэффициенты, сумма которых равна 1, F_1 — суммарный приоритет размещенных форм изделий, F_2 — незанятая площадь вибростола.

Для размещения форм изделий на вибростоле и в помещении цеха формовки может быть построено достаточно большое число различных эвристических алгоритмов.

Рассмотрим один из таких алгоритмов, позволяющий строить несколько размещений форм изделий на вибростолах и площадях цеха формовки, из которых выбирается лучшее размещение по заданному критерию.

Для получения различных размещений изделия, из которых предполагается формировать группу, упорядочиваются по разным признакам. Затем для каждого упорядочивания производится размещение форм изделий на вибростоле и в цехе формовки изделий. Размещение форм изделий производится из разных базовых точек, что также позволяет получать дополнительные варианты их размещений. После этого из построенных размещений в соответствии с заданными критериями, некоторые из которых приведены выше, производится выбор лучшего размещения. Изделия, попавшие в лучшее размещение, включаются в формируемую группу и исключаются из еще не размещенных изделий планового задания.

Среди признаков, по которым производится упорядочивание не размещенных изделий, можно выделить, например, следующие: приоритет изделия, площадь изделия, максимальная длина изделия, максимальная ширина изделия, а также комбинации этих признаков с различными весовыми коэффициентами.

Часто для сокращения времени расчетов при размещении форм изделий задаются контрольные показатели некоторых параметров формирования группы, например, допустимая величина незанятой площади вибростола и площадей цеха формовки или допустимая величина суммарного приоритета размещенных на вибростоле и в цехе формовки изделий. Тогда после выполнения каждого размещения форм производится определение и проверка этих параметров. Если величина незанятой площади вибростола и площадей цеха формовки окажется меньше контрольного показателя, а суммарного приоритета размещенных изделий больше заданного контрольного показателя, то дальнейших размещений форм изделий можно не проводить, а полученное размещение выбирается в качестве решения.

Рассмотрим сначала по шагам алгоритм размещения изделий на вибростоле, а затем покажем, как он может быть использован для размещения изделий в цехе формовки. Это упростит описание алгоритма и облегчит понимание основных принципов его построения.

Шаг 1. По заданному признаку производится упорядочивание изделий, из которых формируется группа, то есть строится последовательность из этих изделий с присвоением соответствующих номеров, а также формируется список базовых точек, по которым будет производиться размещение форм изделий на вибростоле. На первой итерации метода в список

точек включается начальная точка, которая совпадает с одним из углов вибростола и из которой начнется размещение форм изделий из списка.

Шаг 2. Производится проверка списка точек, по которым выполняется размещение форм изделий на вибростоле. Если список таких точек не пуст, то по заданному правилу выбирается точка из списка точек, имеющая, например координаты $(x_k$ и $y_k)$, и следует переход к шагу 3. В противном случае переход к шагу 5.

Шаг 3. Производится проверка возможности размещения форм для изготовления изделий, имеющих более высокий номер, полученный в результате построения последовательности изделий на основе их упорядочения, на базе выбранной точки $(x_k$ и $y_k)$.

Если выполняется хотя бы одно из условий $(L \geq x_k + l_j)$: или $(L \geq x_k + w_j)$, то форма может быть размещена на вибростоле путем совмещения соответствующей угловой точки формы с координатой x_k и стороны формы, которая удовлетворяет приведенному выше неравенству, со стороной вибростола или со стороной уже размещенной формы вдоль оси x .

Если выполняется хотя бы одно из условий $(W \geq y_k + l_j)$: или $(W \geq y_k + w_j)$, то форма может быть размещена на вибростоле путем совмещения соответствующей угловой точки формы с координатой y_k и стороны формы, которая удовлетворяет приведенному выше неравенству, со стороной вибростола или со стороной уже размещенной формы вдоль оси y .

Если форма изделия, имеющего более высокий номер, не может быть размещена с использованием

Если вы должны модить больше, чем составленное расписание, и при этом двигаться вперед по плану.

И. Хакамада

данной точки, то по приведенной выше схеме проверяется возможность размещения формы следующего изделия из ранее сформированной последовательности. Если найдена форма, которая может быть размещена из выбранной точки, то следует переход к шагу 4. В противном случае следует переход к шагу 5.

Шаг 4. Запоминаются координаты вновь размещенной формы, точка $(x_k$ и $y_k)$ вычеркивается из списка точек, по которым производится размещение форм изделий на вибростоле, а в этот список включаются две точки, координаты которых имеют вид $(x_k + l_j, y_k)$ и $(x_k, y_k + w_j)$, если j -я форма размещена так, что вдоль оси x расположена сторона, имеющая длину l_j или $(x_k + w_j, y_k)$ и $(x_k, y_k + l_j)$, если j -я форма размещена так, что сторона, имеющая длину l_j , расположена вдоль оси y . Следует переход к шагу 2 данного алгоритма.

Шаг 5. Вычисляются параметры, по которым производится оценка произведенного размещения. Примеры таких параметров приведены выше. Если вычисленные параметры удовлетворяют заданным условиям, то размещение форм прекращается, и формируются отчеты с координатами размещенных форм. В противном случае меняются признаки, по которым производится упорядочивание форм изделий, используемых для формирования группы, правила выбора точек из списка точек, по которым производится размещение форм изделий на вибростоле, лучший вариант размещения и следует переход к шагу 1.

В качестве параметров, по которым принимается решение о завершении или о продолжении расчетов, могут выбираться незанятые площади на вибростоле и в цехе формовки, суммарный приоритет размещенных форм изделий, а также комбинации этих параметров с различными весовыми коэффициентами.

Правила изменения признаков, по которым производится упорядочивание форм изделий, и правила выбора точек из списка точек, по которым производится размещение форм изделий на вибростоле, зависят от параметров формовочного цеха и производственной программы завода и выбираются в процессе настройки системы управления на работу в конкретных условиях.

Вибростолы обычно устанавливаются в углах формовочного цеха,



Размещение форм изделий на вибростоле

и размещение форм на площади формовочного цеха производится после заполнения вибростолов. Алгоритм размещения форм имеет такой же вид, как и для вибростолов, только начальный список точек размещения форм формируется по-другому.

Рассмотрим формирование начального списка точек размещения форм, когда в формовочном цехе имеется один вибростол. После заполнения вибростола начальными точками для размещения форм изделий в формовочном цехе могут быть точки $(L, 0)$ и $(0, W)$. Далее алгоритм работает по приведенной выше схеме.

Пример размещения форм изделий на вибростоле с использованием описанного алгоритма приведен на рисунке.

Разработанный алгоритм благодаря возможности быстрого размещения форм изделий в цехе формовки и построения расписаний работ можно использовать для получения оценок времени выполнения объемных планов.

Модуль формирования заданий на производственные участки

С использованием данного модуля по информации (хранящейся в БД) о последовательности изготовления групп изделий, о составе изделий, включенных в каждую группу, и технологии изготовления каждого изделия формируются сменно-суточные задания на рабочие места как для формовочного цеха, так и для вспомогательных подразделений.

Модуль диспетчеризации производства

На любом производстве неизбежны отклонения от ранее составленного плана. Для отслеживания хода выполнения плана и его оперативной корректировки служит модуль диспетчеризации.

Информация о ходе выполнения работ (время завершения изготовления производственных партий, количество произведенной продукции, число бракованных изделий и т. д.) заносится в систему.

В модуле реализованы алгоритмы, которые на основании поступающей информации о фактическом ходе работ выявляют отклонения от принятого плана работ и выдают пользователю эту информацию в виде, удобном для принятия решений. Кроме того, в модуле реализованы алгоритмы, позволяющие в случае необходимости корректировать как состав сформированных групп, так и последовательность их изготовления. Необходимость в такой корректировке возникает в случае появления новых срочных заказов, возникновения брака в процессе изготовления изделий, а при отказе от ранее сделанных заказов.

Модуль периодически корректирует время выполнения работ в текущем производственном расписании и в случае необходимости предоставляет возможность внесения в расписание других изменений.

Модуль генерирования отчетов и анализа производственных процессов

Модуль позволяет на основании хранящейся в БД информации о выполнении производственной программы генерировать различные виды отчетов, связанных с ходом выполнения заказов, с перечнем невыполненных, выполненных и реализованных заказов, с состоянием складов сырья, оснастки, форм и готовой продукции, наличием брака, состоянием оборудования и т. д.

Заключение

С разработанными алгоритмами были проведены вычислительные эксперименты, которые показали достаточно высокое качество получаемых планов работы заводов ЖБИ при незначительном времени выполнения расчетов. Применение данной системы на этих заводах позволит повысить загрузку формовочного цеха и за счет этого увеличить их производительность и эффективность работы.

Список литературы

1. *Кунаев М.С., Фирсов А.С., Хоботов Е.Н.* Об одном подходе к построению системы планирования работ на машиностроительном предприятии // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2009. № 4. С. 91–102.
2. *Сидоренко А.М., Хоботов Е.Н.* Об одном подходе к планированию работы производств с параллельной сборкой изделий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2009. №3. С. 102–111.
3. *Хоботов Е.Н.* О некоторых моделях и методах решения задач планирования в дискретных производственных системах // АиТ. 2007. № 12. С. 85–100.
4. *Jain A.S., Meeran S.* Theory and Methodology. Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future // European Journal of Operational Research 113, (1999), P. 390–434.
5. *Зак Ю.А.* Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок. М.: Книжный дом «Либроком», 2011. 393 с.
6. *Bruker P.* Scheduling Algorithms. Leipzig: Springer. 2007. 371 p.
7. *Лазарев А.А., Гафаров Е.Р.* Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. 222 с.
8. *Мухачева Э.А., Валеева А.Ф.* Метод динамического перебора в задаче двумерной упаковки // Информационные технологии. 2000. № 5. С. 30 – 37.
9. *Мухачева Э.А., Валеева А.Ф., Картак В.М., Мухачева А.С.* Модели и методы решения задач ортогонального раскроя и упаковки: аналитический обзор и новая технология блочных структур // Информационные технологии. Приложение. 2004. № 5. 31 с.

Фирсов Антон Сергеевич — аспирант, Рыжиков Антон Олегович — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана, Хоботов Евгений Николаевич — д-р техн. наук, проф. кафедры РК-9 МГТУ им. Н.Э. Баумана, вед. научный сотрудник ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН. Контактный телефон (495) 430-91-68. E-mail: e_khobotov@mail.ru