

Ю.Д. АРИНЕНКОВ, доцент

Донецкий национальный технический университет

## ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НЕПРЕРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЕ

### Введение

Несмотря на бурное развитие теории информатики и вычислительной техники в прошедшем столетии, успехи этих наук не вызвали адекватной реакции экономистов и экспертов в области моделирования промышленных технологий. Более того, как только были устранены вычислительные трудности, стали очевидными проблемы самой идеологии моделирования непрерывных процессов производственно - технологического уровня. Например, анализируя методы экономико-математического моделирования [1], можно заключить, что указанные проблемы состоят в необходимости постоянного подбора функций аппроксимации описания ресурсов, трудности учёта человеческого фактора в принятии оптимизационных решений на основе многокритериальной оценки технологических процессов и наличии недопустимых невязок материального баланса в описании больших плохо обусловленных систем как объединения множества объектов.

Для выяснения причин появления этих проблем обратимся к работам великого французского учёного Анри Пуанкаре, посвящённым научному творчеству и развитию науки: «Как бы робок ни был исследователь, ему необходимо делать интерполяцию; опыт даёт нам лишь некоторое число отдельных точек: их надобно соединить непрерывной линией, и это – настоящее обобщение. Этого мало: проводимую кривую строят так, что она проходит между наблюдаемыми точками – близ них, но не через них. Таким образом, опыт не только обобщается, но и подвергается исправлению; а если бы физик захотел воздержаться от этих поправок и на самом деле удовольствоваться голым опытом, то ему пришлось бы высказывать очень странные законы ([2], с.92).»

В приведенной цитате ключевым для нас предложением будет последнее, так

как из него ясно, что рассуждения Пуанкаре относились только к экспериментаторам-физикам и, по существу, выражали парадигму физико-математического моделирования.

Известно, что физические законы являются следствием проявления множества однотипных воздействий (т.е. измеряются усреднёнными величинами) и описываются простыми функциональными зависимостями. Поиск таких зависимостей как физических законов является основной целью исследования физических явлений, и аппроксимация экспериментальных данных действительно является эффективным приёмом подбора предпочтительной для них функции с отсеиванием случайных помех или ошибок.

В «рукотворных» процессах производственно - технологического уровня зависимости между параметрами не сводятся к простым функциям. Поэтому здесь предпочтение следует отдать методам интерполяции, повышая надёжность описания путём усреднения измеряемых параметров, аппроксимацию же применять только при описании выпуклой (или вогнутой) поверхности отклика по данным эксперимента для регуляризации поиска экстремума критерия эффективности.

Концепция (парадигма - более общее определение) описания характеристик ресурсов и процессов под названием «as is» была предложена автором в работе [3]. На основе такого подхода к описанию непрерывной технологии разработана теория сепарации угля и создана универсальная макромодель технологических схем обогащения фабрик, обеспечивающая аналитическую оптимизацию всех процессов. При этом были предложены два новых метода интерполяции (по заданным точкам и по площади ступенчатого графика) и метод

экономико-технологической оценки результатов обогащения (функция отклика для составления модели процессов), а также доказана сходимость метода последовательных вычислений к «правильному гипотетическому методу» (вместо решения системы уравнений). Столь широкий спектр возможностей, предоставляемых концепцией моделирования «as is», позволяет представлять её как парадигму экономико-математического и экономико-технологического моделирования.

Целью данной статьи является обобщение полученных автором результатов и анализ их применимости к другим сложным непрерывным системам, проблема экономико-математического моделирования которых традиционными методами не решена или решена не достаточно полно.

### *1. Целевое ориентирование функции отклика модели технологического процесса*

В отличие от природного явления, «рукотворный» технологический процесс предназначается для достижения некоторой цели, а точнее, некоторых целей. Известно, что цель функционирования реальных технологий не удаётся описать каким-либо одним критерием. Принято считать, что многокритериальность следует преодолеть методом свёртки первичных критериев (вычислением средневзвешенной величины с назначением веса каждого первичного критерия, вычислением среднего геометрического их значения и др., т.е. свёртка суть та же аппроксимация), но сколько-нибудь веского обоснования таким приёмам не предложено.

Между тем решение проблемы многокритериальности технологических процессов лежит на поверхности данных практического опыта любого производства: это естественный компромисс в выборе режима технологии при недетерминированных ограничениях.

Например, в качестве одного критерия может быть принята прибыль от переработки единицы потребляемого ресурса, а в качестве другого – прибыль, получаемая

в единицу времени. Эти критерии совершенно обоснованны, но они имеют различающиеся размерности и поэтому друг с другом просто не сопоставимы. Ещё в 1974 году в своей кандидатской диссертации автор показал, что решение кажущейся проблемы – в компромиссном выборе параметров технологического режима, а не в свёртке критериев.

Так, при недостатке перерабатываемых ресурсов производительность процессов следует снизить до уровня, при котором достигается максимум прибыли на единицу потребляемого ресурса, при избытке ресурсов производительность процесса необходимо поднять до получения максимальной прибыли в единицу времени, в остальных случаях параметры технологии следует удерживать на линии компромисса между двумя оптимумами для указанных критериев.

Вместе с тем, сами критерии технологии должны не просто вычислять прибыль от переработки единицы ресурса или от выработки в единицу времени, но и различать управляемые и неуправляемые факторы и компенсировать влияние неуправляемых факторов (обеспечивать инвариантность оценки к случайным возмущениям).

Например, прибыль от переработки тонны угля зависит от зольности этого угля. Но зольность рядового угля – это не управляемый параметр. Поэтому оценка эффективности процесса по прибыли от переработки тонны угля будет подвержена сильным помехам – колебаниям зольности рядового угля.

Более предпочтительной будет оценка эффективности только по цене продукта, получаемого из тонны исходного материала. Но угли разных марок имеют различную преysкурантную стоимость, и такая оценка будет непригодна для сравнения оптимальности процессов на углях различных марок.

Влияние марочного состава угля на оценку оптимальности его обогащения можно устранить оценкой извлечения полезных фракций в концентрат как отношением цены реального продукта к цене теор-

ретического продукта (лабораторного, полученного в лабораторных условиях, т.е. оптимального, продукта). Но и такая оценка остаётся ещё в сильной положительной зависимости от зольности обогащаемого угля.

Альтернативой этой оценке оказывается извлечение породных фракций в породу, так как она имеет сильную отрицательную зависимость от зольности обогащаемого угля. И только среднее геометрическое (среднее пропорциональное) этих двух оценок оказывается слабо зависящим от зольности обогащаемого угля как помехи, причём только в ограниченной области её изменения – примерно в интервале от 20 до 70%, но этого как раз достаточно для практических применений такой оценки.

Однако в данном примере среднее геометрическое двух критериев не следует рассматривать как их свёртку – эти критерии имеют одинаковую размерность, они совместимы друг с другом и между ними нет несовместимых противоречий (эти критерии достигают максимума при заданной зольности разделения!): это конструирование более правильного критерия, чем любой один из них.

Конечно, условие оптимальности, которое будет указывать критерий оптимальности, должно быть физически реализуемым, но это уже требование к свойствам системы ценообразования.

Вопросы целеориентирования системы ценообразования (задача о компромиссе требований производителя продуктов и их покупателя к системе ценообразования) изложены автором в работе [4]. Там же дан метод оптимальной настройки технологии обогащения угля по оптимальной величине плотности разделения с учётом влияния золы и серы (без поиска оптимума на процессе) и получен критерий оценки сепарбельности многокомпонентного процесса (для экспериментального исследования такого процесса с целью построения его модели оптимальных настроек независимых переменных процесса).

Таким образом, здесь показано, что критерии экономико-технологической эффективности промышленных процессов

должны быть инвариантными к неуправляемым факторам (в них должен быть встроен алгоритм компенсации влияния измеряемых и всё же не управляемых, внешних к технологии, факторов). Это повышает коэффициент множественной корреляции такой модели до уровня 0,85 и выше (при традиционном уровне 0,4). При этом проблема принятия оптимальных решений на управление каждым технологическим процессом по его многокритериальной модели (или по множеству однокритериальных моделей) надёжно решается методом компромисса.

Эффективность такого управления технологией изучена экспериментально с помощью двумерной системы оптимально связанного регулирования питания флотационного процесса (флотация – процесс отделения мелких частиц угля и породы в пенном слое).

Для решения задачи коэффициенты перекрёстных связей системы регулирования были настроены так, что характеристика равновесия регулируемых параметров этой системы в режимах недетерминированных ограничений оказалась совмещённой с линией компромисса, найденной по двум экономико-математическим моделям процесса флотации угля. При больших отклонениях этих параметров производилось включение/отключение дополнительной флотационной машины.

По недосмотру автора оставленная включенной указанная система без вмешательства человека проработала шесть месяцев, прежде чем персонал фабрики заметил сопротивление регулирующих органов системы их ручной перестановке. Разбор с экспертами-флотаторами этой ситуации показал, что параметры системы и положение её регулирующих органов соответствуют наилучшему варианту.

Анализ диаграммных записей параметров за тот период показал, что достаточно часто наблюдалось отклонение параметров расхода и плотности от заданных (оптимальных) параметров питания процесса флотации, но во всех случаях отношения этих отклонений соответствовали отрицательному коэффициенту наклона

линии компромисса, т.е. система автоматизации надёжно удерживала управляемые параметры процесса на линии компромисса.

## 2. Экономико-технологическая функция процесса

Наличие обоснованных критериев эффективности технологического процесса является гарантией того, что получаемые с оценкой по этим критериям оптимизационные экономико-математические модели процесса позволят ранжировать различные факторы по степени их влияния на процесс и выбрать предпочтительную структуру управления процессом. Для описания технологии с целью прогноза параметров получаемых продуктов требуется более полная модель – экономико-технологическая, обеспечивающая также описание характеристик подаваемых в процесс ресурсов и в соответствии с алгоритмом их переработки – выдаваемых этим процессом продуктов (последние выступают в качестве ресурсов для последующих процессов).

Очевидно, алгоритм переработки ресурсов для каждой технологии является специфичным. Например, для углеобогащения он основан на разделении частиц исходного угля на концентратные и породные фракции по физическому фактору с учётом критерия селективности. Фактор разделения задаётся по величине оптимальной зольности фракций, которая определяется по преискуранту цен на продукты обогащения с учётом влияния содержания серы, а критерий селективности нормирован установленной автором областью возможных характеристик продуктов обогащения. Обосновать и применить такой метод стало возможным после разработки методов рекурсивного *knot*- и *area*-продолжения массивов данных ситового и фракционного составов, позволивших получить полное и наиболее точное описание экономико-технологической модели обогащательного процесса.

Таким образом, экономико-технологическое моделирование процесса обеспечивает подробное описание получе-

ния оптимальных выходных (управляемых) параметров процесса, в то время как экономико-математическое моделирование своей целью ставит свёртку выходных параметров процесса до получения единственной оценки оптимального режима с нахождением оптимальных настроек входных (управляющих) параметров процесса. Физико-математическое моделирование ставит своей целью описать явление как связь совокупности физических величин вне зависимости от какой-либо оценки целесообразности этого явления.

## 3. Интерполяция характеристик потребляемых ресурсов и производимых продуктов

Методы интерполяции табличных данных достаточно полно охарактеризованы в работах [3, 5], там же дана библиография работ автора с детальным изложением частных вопросов по обсуждаемой тематике. Поэтому здесь рассмотрим эти методы с точки зрения применимости их в других сложных технологиях. При этом будем различать точечный массив (значение определено в точке массива) и интервальный массив (значение среднее по интервалу, так что толерантная этому значению точка внутри интервала не указана).

Метод рекурсивного *knot*-продолжения точечных массивов данных ситового состава определяет новые опорные точки в центре тяжести доверительных треугольников, образованных стягивающей хордой интерполируемого интервала и хордами смежных интервалов интерполяции. В случае, если точка пересечения хорд смежных интервалов не вписывается в область интерполируемого интервала, посередине стягивающей хорды этого интервала назначается точка перегиба. После нахождения новых опорных точек во всех интервалах номера точек удваивают и выполняют очередную рекурсию. Метод функционально обратим, поэтому при появлении некорректной операции (деление на нуль) производится переход к обратной функции (вместо функции  $y(x)$  рассматривается функция  $x(y)$ ) и вычислительный процесс

процесс продолжается, так что метод оказывается применимым к кривым любой сложности, в том числе многозначным.

Метод рекурсивного *area*-продолжения интервальных массивов данных фракционного состава интерполирует (сглаживает) ступенчатый график (задана площадь каждой ступени графика). В основу метода положена идея W. Maclarren [6]: точки начала и конца 2-кусочно-линейной функции назначаются посередине высоты ступенек графика, а точка излома интерполирующей функции располагается на самой ступеньке и так, что площадь отбрасываемого треугольника ступеньки оказывается равной площади добавляемого треугольника. Благодаря этому достоинство метода Макларрена и состоит в том, что результаты интерполяции не зависят от выбора направления счёта фракций – справа налево или слева направо.

$$\dot{\lambda}_{i-2} = (\lambda_{i-2} + \lambda_i) / 2, \quad (1)$$

$$\Delta \dot{\gamma}_{i-1} = \begin{cases} \frac{\lambda_{i+2} - \lambda_i}{\lambda_{i+2} - \lambda_{i-2}} \cdot \Delta \gamma_i, & \text{если } \Delta \gamma_i = 0 \text{ или } |\lambda_{i+2} - \lambda_i| + |\lambda_i - \lambda_{i-2}| = 0 \\ \frac{|\lambda_{i+2} - \lambda_i|}{|\lambda_{i+2} - \lambda_i| + |\lambda_i - \lambda_{i-2}|} \cdot \Delta \gamma_i, & \text{если } \Delta \gamma_i \neq 0 \text{ и } |\lambda_{i+2} - \lambda_i| + |\lambda_i - \lambda_{i-2}| \neq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

$$\dot{\lambda}_{i-1} = \begin{cases} \lambda_i, & \text{если } \Delta \gamma_i = 0 \text{ или } |\lambda_{i+2} - \lambda_i| + |\lambda_i - \lambda_{i-2}| = 0 \\ \frac{1}{2} \left( 3\lambda_i - \lambda_{i+2} + \frac{\lambda_{i+2} - \lambda_{i-2}}{\Delta \gamma_i} \cdot \Delta \gamma_{i-1} \right), & \text{если } \Delta \gamma_i \neq 0 \text{ и } |\lambda_{i+2} - \lambda_i| + |\lambda_i - \lambda_{i-2}| \neq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\Delta \dot{\gamma}_i = \Delta \gamma_i - \Delta \dot{\gamma}_{i-1}, \quad (4)$$

$$\dot{\lambda}_i = (\lambda_i + \lambda_{i+2}) / 2, \quad (5)$$

где  $\Delta \gamma_i$  и  $\lambda_i$  - выход и средневзвешенная зольность  $i$ -й фракции, причём, все числа  $i=0, 2, 4, \dots, n$  - чётные, а нечётные зарезервированы для прогнозируемых переменных и кружком сверху помечены прогнозируемые переменные (для элементарных фракций), причём все величины выражены в долях единицы, а верхние условия в формулах (2) и (3) соответствуют ме-

Полученные таким путём две трапеции из каждой ступеньки затем преобразуются в эквивалентные прямоугольники. В результате каждой рекурсии количество ступеней (фракций) удваивается, и рекурсии повторяются до тех пор, пока не будет получено желаемое количество мелких фракций. Полученная плавная монотонная или не строго монотонная кривая уже не проходит через начальные точки по Макларрену.

Но характеристики распределения фракций могут быть и не монотонными, что практически всегда наблюдается в распределении серы по фракциям. Поэтому метод был развит в направлении применимости его к немонотонным функциям. В окончательном виде алгоритм *area*-продолжения массива для  $i$ -ой фракции даётся следующими формулами:

$$(1)$$

$$(2)$$

$$(3)$$

$$(4)$$

$$(5)$$

тому Макларрена.

После такого деления всех интервалов предлагается полученные трапеции фракций преобразовать в эквивалентные прямоугольники для всех  $i=0, 2, 4, \dots, n$  по формулам

$$\Delta \dot{\gamma}_{i-1} = \Delta \dot{\gamma}_{i-1}, \quad (6)$$

$$\lambda_{i-1} = (\dot{\lambda}_{i-2} + \dot{\lambda}_{i-1}) / 2, \quad (7)$$

$$\Delta\gamma_i = \Delta\gamma_i - \Delta\dot{\gamma}_{i-1}, \quad (8)$$

$$\lambda_i = (\dot{\lambda}_{i-1} + \dot{\lambda}_i) / 2. \quad (9)$$

После этого величины всех индексов массива следует удвоить и к новому массиву фракций снова применить такую же процедуру продолжения размера массива и повторять её (методом рекурсии) до разумного количества фракций. Результат продолжения массива данных фракционного состава немонотонной последовательности показан на рисунке.

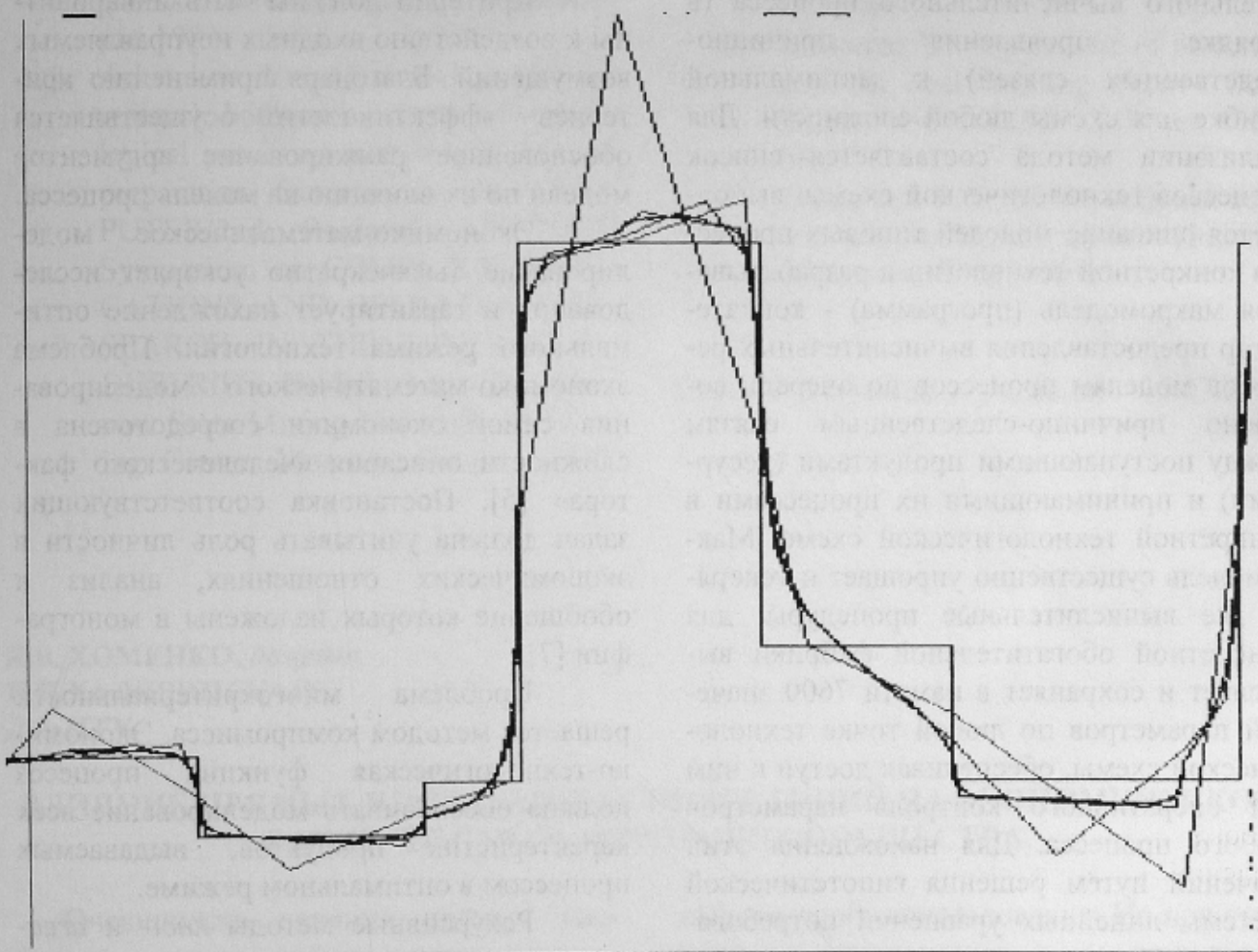


Рисунок - Рекурсивное *area*-продолжение массива данных (фрагмент)

На этом рисунке показаны кривые после каждой рекурсии. Можно заключить, что уже первая рекурсия существенно сглаживает ступенчатый график, каждая последующая рекурсия как бы колебательно сглаживает предыдущие графики, и на четвёртой рекурсии полученный график почти не отличается от предыдущего, он уже существенно сглаженный. Нужно под-

черкнуть, что точки, назначенные посередине высот ступенек фракций в текущей рекурсии, игнорируются в следующей при удвоении массива; и в текущей рекурсии зависимость уже не проходит через середины высот ступенек первичных фракций, сохраняя и обоснованную плавность, и баланс золы первоначальных фракций.

#### 4. Метод описания технологических схем сложной технологии

В результате постановки и решения перечисленных задач теперь кажется логичным объединение множества сепарационных процессов с разделяющимися потоками и циркуляциями на основе принципа катенации.

Имитационными исследованиями установлено, что катенация выдаваемых продуктов и входов технологических процессов обеспечивает сходимость последовательного вычислительного процесса (в порядке проявления причинно-следственных связей) к минимальной ошибке для схемы любой сложности. Для реализации метода составляется список процессов технологической схемы, выполняется описание моделей типовых процессов конкретной технологии и разрабатывается макро модель (программа) - конкатенатор предоставления вычислительных ресурсов моделям процессов по очереди согласно причинно-следственным связям между поступающими продуктами (ресурсами) и принимающими их процессами в конкретной технологической схеме. Макро модель существенно упрощает и ускоряет все вычислительные процедуры, для конкретной обогатительной фабрики вычисляет и сохраняет в памяти 7600 значений параметров по любой точке технологической схемы, обеспечивая доступ к ним для оперативного контроля параметров любого процесса. Для нахождения этих значений путём решения гипотетической системы линейных уравнений потребовалось бы составлять и решать матрицу с количеством элементов 48094225. Только ввод элементов этой матрицы, без обоснования самой системы уравнений, занял бы более 100 лет, при новой же методологии подобные вопросы вообще не возникают.

#### Выводы

Главный практический результат этой работы: разработанные методы достаточны для описания непрерывной технологии и объединяются в неизменный для раз-

личных схем программный модуль (макро модель) как ядро АСУ ТП - конкатенатор процессов и их продуктов в соответствии с описанием топологии конкретной технологической схемы.

Модели технологических процессов следует подразделять на экономико-математические (для поиска оптимального режима) и экономико-технологические (для прогноза оптимальных получаемых продуктов), причём экономико-математические модели должны иметь два или более критериев эффективности.

Критерии должны быть инвариантны к воздействию входных неуправляемых возмущений. Благодаря применению критериев эффективности осуществляется обоснованное ранжирование аргументов модели по их влиянию на модель процесса.

Экономико-математическое моделирование тысячекратно ускоряет исследования и гарантирует нахождение оптимального режима технологии. Проблема экономико-математического моделирования самой экономики сосредоточена в сложности описания «человеческого фактора» [5]. Постановка соответствующих задач должна учитывать роль личности в экономических отношениях, анализ и обобщение которых изложены в монографии [7].

Проблема многокритериальности решается методом компромисса. Экономико-технологическая функция процесса должна обеспечивать моделирование всех характеристик продуктов, выдаваемых процессом в оптимальном режиме.

Рекурсивные методы *knot*- и *area*-продолжения точечных и интервальных массивов соответственно обеспечивают интерполирование данных от функций любой сложности без поиска их аналитического описания и каких-либо других ограничений.

Предлагаемая парадигма экономико-математического и экономико-технологического моделирования сложных непрерывных систем «as is» ориентирует объединение массивов данных с кодами их рекурсивного продолжения, компромисс в

многокритериальности моделей и катенацию как методы описания больших систем.

### Литература

1. Лотов А.В. Введение в экономико-математическое моделирование / Под ред. Н.И.Моисеева. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 392с.
2. Пуанкаре Анри. О науке: Пер. с франц.- М. Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 560с.
3. Arinenkov Yu. Universal model for research both optimization of technological processes and circuits of coal preparation factories on the COMPUTER/2nd Regional APCOM'97 Symposium on COMPUTER APPLICATIONS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRIES. Published by: The Moscow State Mining University Publishing Center. Moscow, Pussia - 1997. 536р. - P.209-214.
4. Ариненков Ю.Д. Аналитическая оптимизация процессов переработки полезных ископаемых // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Економічна. - Донецьк: ДонДТУ, 2001. Випуск 37. - С. 181-188.
5. Ариненков Ю.Д. Экономико-математическое моделирование может быть точным // Вісник Академії економічних наук України: Науковий щорічник -2003. -№2, С.79 - 84.
6. Maclarren W. A guarantee of performance for coal washing plant - Coll. Guard. - 1931. Vol. CXLIII, pp. 198 - 201; 375.
7. Дементьев В.В. Экономика как система власти. Монография. – Донецк, «Каштан». -2003. –404с.

Статья поступила в редакцию 15.03.2004

**Я.В. ХОМЕНКО, доцент**  
**И.И.ХАЛЯВИНСКАЯ**  
*ДонНТУ*

### ВЛИЯНИЕ ПРЯМЫХ ИНОСТРАННЫХ ИНВЕСТИЦИЙ НА ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ СТРАН МИРОВОГО СООБЩЕСТВА.

Очевидность влияния прямых иностранных инвестиций на темпы экономического роста большинства стран в настоящий момент является бесспорным фактом. В процессах глобализации мировой экономики международные потоки инвестиционного капитала играют не менее, если не более, значительную роль, чем международная торговля товарами и услугами. В современном мире практически не осталось стран, не вовлеченных в процесс международного инвестиционного сотрудничества. Стало аксиомой, что устойчивое экономическое развитие невозможно без

эффективного использования. Но при этом в странах с разным уровнем экономического развития прямые иностранные инвестиции играют неодинаковую роль. Это зависит от ряда факторов, в их числе: мотивация иностранных инвесторов, цели, которые ставит перед собой принимающая страна, политика, проводимая страной, по отношению к иностранным инвестициям.

В последние годы XX в. наблюдался колоссальный рост масштабов прямого иностранного инвестирования, который