

Стратегии оперативного планирования дискретно-непрерывного производства

Р. А. Шайдуллин

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого

sh_rena@rambler.ru

Аннотация. Рассматривается задача оперативного (календарного) планирования производства для предприятий с дискретно-непрерывным характером операций, таких как нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) и нефтехимические комплексы. Обоснована актуальность разработки оптимизационных моделей для реализации стратегий планирования, предложена математическая формулировка, относящаяся к классу задач линейного программирования с частью целочисленных переменных. Особое внимание уделено моделированию режимов работы, временных задержек, очередности операций и ограничений на хранение материала. Для снижения вычислительной сложности предложен метод декомпозиции на подмодели производственной и товарно-сырьевой частей НПЗ. Приведены результаты апробации модели на данных НПЗ с горизонтом планирования 10 суток с детализацией до смен. Сделаны выводы о возможности применения разработанной стратегии для повышения эффективности оперативного (календарного) планирования производства.

Ключевые слова: оперативное планирование, календарное планирование; дискретно-непрерывное производство; смешанное целочисленное линейное программирование; MILP; оптимизационная модель; нефтепереработка.

I. ВВЕДЕНИЕ

В условиях неопределенности и изменчивости факторов производства, таких, как поставка сырья, работоспособность оборудования, возможность отгрузки продукции, важным становится способность быстро реагировать на незапланированные события, в том числе в части перепланирования производства, с учетом новых условий работы производства.

Планирование производства на предприятиях с дискретно-непрерывным характером, таких как нефтеперерабатывающий завод (НПЗ)/ нефтехимический комплекс (НХК), происходит на нескольких уровнях. Уровень текущего планирования, на котором рассчитывается производственная программа на месяц – отвечает на вопрос «что производить?» и является отправной точкой планирования. Уровень оперативного или календарного планирования в качестве цели выполнения имеет текущий план, формируется с детализацией от суток до смен на неделю, декаду или месяц, а также может иметь более глубокую детализацию для ряда производственных этапов, так как отгрузка готовой продукции производится с точностью до часов и минут и горизонтом планирования 1-3 суток. Календарный план отвечает на вопрос «как производить?». Ключевая задача - распределить во времени все производственные операции, перемещение сырья и полуфабрикатов между переделами, а также

операции приемки и отгрузки, строго соблюдая технологические регламенты и лимитирующие факторы.

Эффект от внедрения моделей календарного планирования и составления расписания заключается в повышении эффективности производства и способности быстро реагировать на изменения. Эффект от внедрения систем управления цепями поставок достигает 2 млрд. рублей за 7 лет эксплуатации [1]. Внедрение системы календарного планирования также обеспечивает снижение запаса по качеству, снижение остатков продукции на складах предприятия и увеличение производительности труда [2]. Однако все эти эффекты достигается только при высоком уровне автоматизации предприятия. Это обусловлено тем, что:

- в моделях календарного планирования требуется учитывать существенно больше деталей производства, чем в моделях текущего планирования;
- подготовка данных и составление календарного плана и расписания должны осуществляться не реже одного раза в трое суток, а сам процесс должен занимать не более часа, что и определяет требования к средствам интеграции информационных систем разного класса (MES, APS, ERP).

Актуальность развития стратегий оперативного планирования диктуется текущей необходимостью быстро реагировать на внешние изменения производства для обеспечения его непрерывности и эффективности.

II. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ

Существующие подходы к задаче календарного планирования производства делятся на детерминированные и недетерминированные, применяются точные и эвристические методы. К точным относятся модели линейного программирования с частью целочисленных переменных (MILP) [3]. MILP-модели различаются по представлению времени: дискретное и непрерывное. Модели с дискретным временем требуют малых интервалов, что увеличивает размерность. Модели с непрерывным временем сокращают размерность, но усложняют балансы. Существует дискретно-непрерывное представление [4]. Проблему размерности решают добавлением ограничений, декомпозицией на стадии, последовательным решением трёх подзадач [5]. Для уменьшения времени поиска плана используют переформулирование ограничений, отсечения, эвристики и декомпозицию.

Из-за высокой сложности общую модель всего производства НПЗ обычно не строят, а разделяют

процесс на три передела: поступление сырья, первичная и вторичная переработка, смешение и отгрузка [6].

Имитационное моделирование также используется для определения стратегии оперативного планирования, при этом могут применяться объектно-ориентированные, агентные и распределенные подходы. Типовой алгоритм содержит такие шаги, как инициализация, проверка ограничений на интервале, корректировка графиков, переход к следующему интервалу. Недостатком метода является невозможность найти глобальный оптимум, при этом и достоверное решение не гарантируется. Однако имитационный подход применяется для анализа сценариев в цепочках поставок. [7].

Для повышения эффективности имитационных моделей применяют эвристические методы поиска календарного плана. Для этого могут использоваться подходы локального поиска, жадные алгоритмы, генетические алгоритмы [8] и методы решающих правил. Генетические алгоритмы эффективны для дискретных производств с большой размерностью, но сложны для непрерывных процессов из-за нелинейности качественных показателей.

Модели на основе нейронных сетей имеют большой потенциал [9], но ограничены из-за потребности в больших объёмах размеченных данных, сложности интерпретации и вычислительных затрат. Актуальным видится гибридный подход: нейронные сети плюс оптимизационные модели.

III. МОДЕЛЬ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Модель определяет моменты начала и окончания операций и перемещений материалов. К основным ограничениям модели относятся производительность установок, ограничения на объем хранения материала, а также ограничения на выполнение текущего плана производства. Формулировка модели календарного планирования, с учетом указанных ограничений, представляется в виде задачи линейного программирования с частью целочисленных переменных (MILP) [10]. Время в модели дискретно, горизонт планирования разбивается на NT равных периодов. Продолжительность периода может составлять час, несколько часов, смена или день.

Для каждой установки u ($1..NU$) и режима pl ($1..NPL_u$) вводится целочисленная переменная $y_{u,pl,t}$ – запуск режима в период t . Ограничение (1) запрещает одновременную работу установки в нескольких режимах.

$$\sum_{pl=1}^{NPL_u} \sum_{tt=0}^{\tau_{u,pl}-1} y_{u,pl,t-tt} \leq 1,$$

$$\forall t-tt \geq 1, u = 1..NU \text{ и } t = 1..NT, \quad (1)$$

Для установок с задержкой материала используются ограничения (2)–(4), где переменные работы $y_{u,pl,t}$, простоя $y_{w_{u,pl,t}}$ и завершения $y_{d_{u,pl,t}}$, связаны с $y_{u,pl,t}$. Они могут быть нецелочисленными на отрезке $[0,1]$, так как обуславливаются целочисленностью $y_{u,pl,t}$, тем самым облегчая вычислительную нагрузку данной формулировки.

$$y_{u,pl,t} = \sum_{tt=0}^{\tau_{u,pl}-1} y_{u,pl,t-tt}, \quad \forall t-tt \geq 1, pl = 1..NPL_u, \\ u = 1..NU \text{ и } t = 1..NT, \quad (2)$$

$$y_{w_{u,pl,t}} = \sum_{tt=1}^{\tau_{u,pl}-2} y_{u,pl,t-tt}, \quad \forall t-tt \geq 1, pl = 1..NPL_u, \\ u = 1..NU \text{ и } t = 1..NT, \quad (3)$$

$$y_{d_{u,pl,t}} = y_{u,pl,t-\tau_{pl}+1} \quad \forall pl = 1..NPL_u, u = 1..NU \text{ и } \\ t = 1..NT, \quad (4)$$

Установки непрерывной работы описываются балансами без задержек.

Для каждого резервуара p ($1..NP$) соблюдается уравнение материального баланса (5):

$$zh_{p,t} = zh_{p,t-1} + zfi_{p,t} - zjf_{p,t}, \\ \forall p = 1..NP \text{ и } t = 2..NT, \quad (5)$$

В каждый момент времени в резервуаре может храниться только один тип материала, это обеспечивается ограничением (6) на режимы pk :

$$\sum_{pk=1}^{NPK_p} z_{p,pk,t} = 1, \quad \forall p = 1..NP \text{ и } t = 1..NT, \quad (6)$$

Параметры «включение/выключение, когда больше/меньше» (Рис. 1) задаются ограничениями (7)–(10):

$$XH_{p,pk}^{SUWA} - zh_{p,t-1} - XH_{p,pk}^{\max} + XH_{p,pk}^{\max} \cdot (z_{p,pk,t} - z_{p,pk,t-1}) \leq 0, \\ \forall p = 1..NP, pk = 1..NPK \text{ и } t = 2..NT, \quad (7)$$

$$zh_{p,t-1} - XH_{p,pk}^{SUWB} - XH_{p,pk}^{\max} + XH_{p,pk}^{\max} \cdot (z_{p,pk,t} - z_{p,pk,t-1}) \leq 0, \\ \forall p = 1..NP, pk = 1..NPK \text{ и } t = 2..NT, \quad (8)$$

$$XH_{p,pk}^{SDWA} - zh_{p,t-1} - XH_{p,pk}^{\max} + XH_{p,pk}^{\max} \cdot (z_{p,pk,t-1} - z_{p,pk,t}) \leq 0, \\ \forall p = 1..NP, pk = 1..NPK \text{ и } t = 2..NT, \quad (9)$$

$$zh_{p,t-1} - XH_{p,pk}^{SDWB} - XH_{p,pk}^{\max} + XH_{p,pk}^{\max} \cdot (z_{p,pk,t-1} - z_{p,pk,t}) \leq 0, \\ \forall p = 1..NP, pk = 1..NPK \text{ и } t = 2..NT, \quad (10)$$

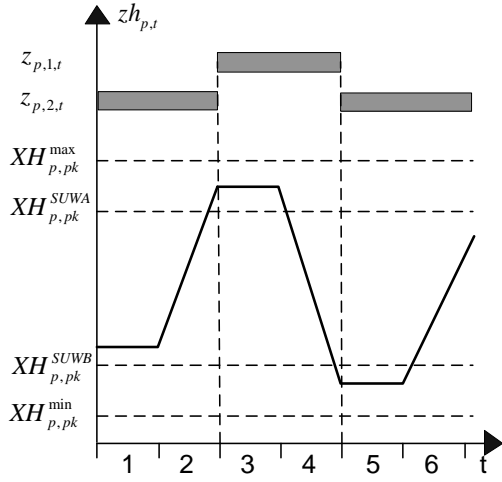


Рис. 1. «Включение, когда больше», «включение, когда меньше»

Для управления заполнением/опорожнением (рис. 2) вводятся целочисленные переменные направления и ограничения (11)–(12):

$$zh_{p,t} + \sum_{pk=1}^{NPK} (-XH_{p,pk}^{FTF} \cdot z_{p,pk,t} + XH_{p,pk}^{\max} \cdot z_{p,pk,t} - XH_{p,pk}^{\max} \cdot (y_{p,pk,t}^{FD} - y_{p,pk,t-1}^{FD})) \geq 0, \quad \forall p = 1..NP, \text{ и } t = 2..NT, \quad (11)$$

$$zh_{p,t} + \sum_{pk=1}^{NPK} (XH_{p,pk}^{DTF} \cdot z_{p,pk,t} + XH_{p,pk}^{\max} \cdot z_{p,pk,t} - XH_{p,pk}^{\max} \cdot (y_{p,pk,t-1}^{FD} - y_{p,pk,t}^{FD})) \geq 0, \quad \forall p = 1..NP, \text{ и } t = 2..NT, \quad (12)$$

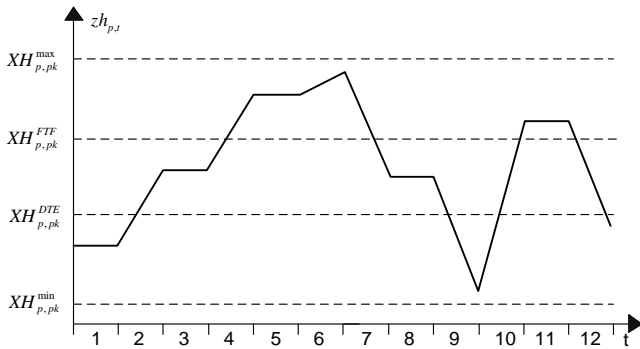


Рис. 2. Заполнение и опорожнение резервуара

Задержки перед заполнением или опорожнением (рис. 3) моделируются ограничениями (13)–(16):

$$yc_{j,ipl,t} + yc_{j,ipl,t+tt} \leq 1, \quad \forall tt = 0.. \tau_{DFD,p,pl}^{\min} \text{ и } t = 1..NT \mid t + tt \leq NT, \quad (13)$$

$$yc_{j,ipl,t-1} - yc_{j,ipl,t} - \sum_{tt=1}^{\tau_{DFD,p,pl}^{\max}} yc_{j,ipl,t+tt} \leq 0,$$

$$\forall t = 1..NT - \tau_{DFD,p,pl}^{\max} \mid t + tt \leq NT, \quad (14)$$

$$yc_{jpl,i,t} + yc_{j,ipl,t+tt} \leq 1, \quad \forall tt = 0.. \tau_{DFD,p,pl}^{\min} \text{ и } t = 1..NT \mid t + tt \leq NT, \quad (15)$$

$$yc_{jpl,i,t-1} - yc_{jpl,i,t} - \sum_{tt=1}^{\tau_{DFD,p,pl}^{\max}} yc_{j,ipl,t+tt} \leq 0,$$

$$\forall t = 1..NT - \tau_{DFD,p,pl}^{\max} \mid t + tt \leq NT, \quad (16)$$

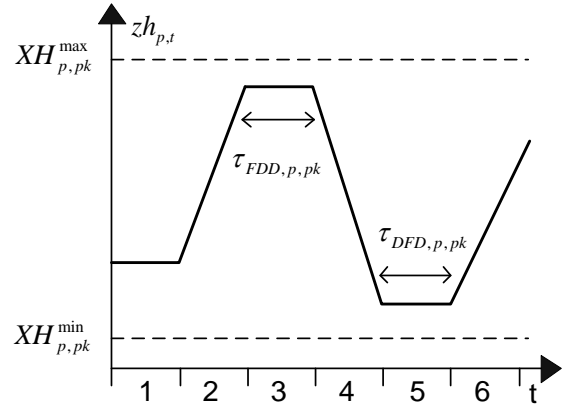


Рис. 3. Задержка перед заполнением и опорожнением

Моделирование периметров. Для входных периметров e (1..NE) и выходных q (1..NQ) задаются заявки на поставку/отгрузку (17)–(18) материала. Для дискретных потоков добавляются ограничения (19)–(20)

$$ef_{e,j,t} = a_{e,j,t},$$

$$\forall t = 1..NT, \quad j = 1..NEJ_e \text{ и } e = 1..NE, \quad (17)$$

$$qf_{q,i,t} = b_{q,i,t},$$

$$\forall t = 1..NT, \quad i = 1..NQI_q \text{ и } q = 1..NQ, \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^{NT} a_{e,j,t} = a_{e,j}^{full}, \quad \forall j = 1..NEJ_e \text{ и } e \in E_{disc}, \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^{NT} b_{q,i,t} = b_{q,i}^{full}, \quad \forall i = 1..NQI_q \text{ и } q \in Q_{disc}, \quad (20)$$

Соединения между элементами модели описываются уравнением (21):

$$ef_{e,j,t} = xf_{u,i,t}, \quad \forall t = 1..NT, \quad j \in EJ_{e,u}, \quad e \in E_{xf}, \quad i \in I_{u,e} \quad u \in U_{ef} \quad (21)$$

Целевая функция минимизирует количество переключений режимов работы установок (22) и резервуаров (23), а также сумму штрафных переменных за нарушения ограничений рп.

$$su = \sum_{t=1}^{NT} \sum_{u=1}^{NU} \sum_{pl=1}^{NPL_u} y_{u,pl,t} \quad (22)$$

$$sp = \sum_{t=1}^{NT} \sum_{p=1}^{Np} \sum_{pk=1}^{NPK_p} z_{p,pk,t} \quad (23)$$

Целевая функция модели будет выглядеть следующим образом:

$$J = \min(\alpha \cdot su + \beta \cdot sp + \gamma \cdot pn), \quad (24)$$

где α, β и γ – весовые коэффициенты при соответствующих переменных. Варьируя эти значения, можно расставить приоритеты оптимизации всех доступных в модели переменных. Стоит отметить, что весовой коэффициент при сумме штрафных переменных должен быть на несколько порядков больше, чем другие коэффициенты для того, чтобы получать адекватные решения.

Расчеты модели (1)–(24) сводятся к решению задачи линейного программирования с частью целочисленных переменных. В результате расчета данной модели определяются потоки между установками, запасы резервуаров, а также значения всех целочисленных переменных, по которым определяется тип выполняемого на данном промежутке времени режима работы установки, тем самым – строится календарный план производства.

IV. АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ

При апробации модели календарного планирования задача была разделена на две подзадачи – производственная часть НПЗ и товарно-сырьевая часть НПЗ. Такая декомпозиция позволила сократить время подготовки и валидации исходных данных для каждой из подзадач, сократить время нахождения решения, а также быстрее осуществлять анализ полученных с использованием модели решений. Вторая задача в свою очередь решалась с помощью двух независимы моделей – модель светлых нефтепродуктов и модель темных нефтепродуктов из-за особенностей производства. Решение осуществляется в следующем порядке: составляется календарный план работы производственной части НПЗ и определяются объемы и время поступления продуктов в товарно-сырьевую часть НПЗ, таким образом определяются исходные данные для второй части, где уже определяются график работы эстакад налива, резервуаров и график отгрузки. Две модели товарно-сырьевого парка НПЗ могут запускаться параллельно, так как не зависят друг от друга.

Для подготовки календарного плана с помощью модели планирования решалась задача линейного программирования с частью целочисленных переменных в коммерческом решателе Dash Optimization на персональном компьютере с процессором Intel Core i5 4310U с тактовой частотой 2,8ГГц и 16 Гб оперативной памятью.

Расчет календарного плана производился на 10 суток с интервалом планирования, равным 8 часов. Таким образом на горизонте планирования было 30 периодов времени.

Модель производственной части НПЗ. Матрица модели имела 32450 ограничений и 11504 переменных, 750 из которых – целочисленные. Первое решение без штрафов было найдено за 75 секунд, за 280 секунд поиска было найдено 9 решений без штрафов, последнее

– 9ое решение отличается от оценки целевой функции на 31%. На 300 секунде поиск был завершен.

Модель светлых нефтепродуктов. Матрица модели имела 43230 ограничений и 20671 переменных, 1795 из которых – целочисленные. Решение без штрафов было найдено за 16 секунд, после чего поиск был завершен. Найденное решение не отличается от оценки целевой функции.

Модель темных нефтепродуктов. Матрица модели имела 12019 ограничений и 6372 переменных, 897 из которых – целочисленные. Решение без штрафов было найдено за 36 секунд, после чего поиск был завершен. Найденное решение отличается от оценки целевой функции на 41%.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования разработана и апробирована оптимизационная модель календарного планирования для предприятий с дискретно-непрерывным типом производства. Представленная модель может быть использована для повышения гибкости производства в условиях высокой волатильности внешних факторов. При изменении сроков поставок сырья, графика отгрузки продуктов, или при наступлении незапланированных событий, таких как остановки и ремонт оборудования, разработанная модель планирования позволяет:

- оперативно пересчитать календарный план;
- оценить выполнимость заданной производственной программы;
- определить, какие ограничения нарушаются, если выполнить месячный план производства в существующих ограничениях уже не представляется возможным.

При использовании модели предлагается декомпозиция общей задачи на ряд взаимосвязанных подмоделей, например, модель поставки и размещения сырья, модель производственной части (первичная и вторичная переработка), и модель товарно-сырьевого парка, которая может включать линии налива и фасовки. Такой подход позволит не только сократить время расчета решения, но и упростит процесс подготовки и валидации исходных данных, а также интерпретацию полученных результатов.

Апробация модели на реальных данных нефтеперерабатывающего завода с горизонтом планирования 10 суток (30 периодов по 8 часов) подтвердила ее работоспособность. Для всех подмоделей были получены допустимые решения. Размерность задач варьировалась от 12 тыс. до 43 тыс. ограничений с количеством целочисленных переменных до 1800. Время решения на стандартном персональном компьютере с использованием коммерческого солвера составило от 16 секунд до 5 минут, что приемлемо для задач оперативного планирования. Полученные результаты были визуализированы в виде диаграмм Ганта (рис. 4) для установок, резервуаров и эстакад, а также в виде трендов изменения запасов (рис. 5), что наглядно демонстрирует последовательность операций, загрузку оборудования и динамику материальных потоков.

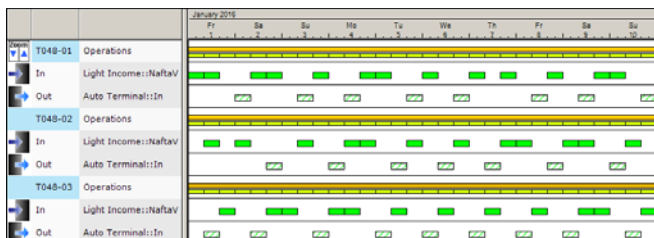


Рис. 4. Диаграмма Ганта работы резервуаров

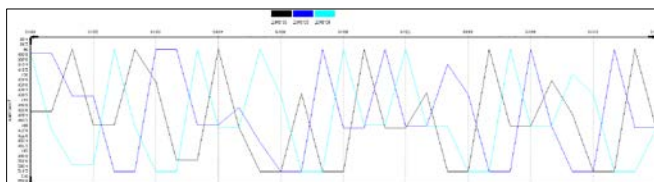


Рис. 5. Тренды резервуаров

Таким образом, разработанная модель может служить эффективным инструментом для стратегии оперативного планирования и управления производством.

VI. ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Следует отметить, что предложенная математическая модель базируется на аппарате частично целочисленного линейного программирования (MILP), что требует высокой квалификации ее пользователя при использовании, и особенно при анализе полученных решений. По отчету о нарушениях ограничений модели необходимо интерпретировать соответствующую производственную ситуацию. Например, если получено решение со штрафом за переполнение резервуара, то такой календарный план использовать невозможно, и необходимо провести корректировку исходных данных, например – снизить производительность установки или изменить график отгрузки, а значит, принимать управленческие решения. Указанная проблема выходит за рамки данной работы, включает вопросы взаимодействия комплекса систем планирования,

моделей, а также вопросы интеграции и оптимизации бизнес-процессов, и требует дополнительного исследования.

Дальнейшее развитие работы может быть направлено на применение непрерывного времени в модели планирования и событийного подхода, интеграцию модели с комплексом систем планирования, а также на разработку методов ускорения решения для перехода к интерактивному режиму перепланирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Сергей Орлов, Все звенья цепи, Сибирская Нефть, №10/117, Декабрь 2014, с. 34-42.
- [2] Шайдуллин Р.А., Аспекты экономической эффективности внедрения автоматизированной системы календарного планирования на предприятиях нефтегазового комплекса // Вестник СГЭУ, 4(102), 2013, с.143-147
- [3] Mixed Integer Linear Programming in Process Scheduling: Modeling, Algorithms, and Applications, Christodoulos A. Floudas, Xiaoxia Lin, Annals of Operations Research 139, 131–162, 2005, 131-162.
- [4] Хоботов Е.Н. Модели планирования и управления работой систем по смешению масел // АиТ. 2008. № 11. С. 187 – 189
- [5] Jia Z., Iearapetritou M. Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation // Comp. Chem. Eng. 2004. V. 28. P. 1001-1019.
- [6] Bengtsson J., Nonås S.-L. Refinery planning and scheduling – An overview. Institute for Research in Economics and Business Administration, Bergen, 2009.
- [7] Simulation in the supply chain context: a survey, Sergio Terzia, Sergio Cavalierib, Computers in Industry 53 (2004) 3–16
- [8] Васильев А. С., Матвейкин В. Г. Модификация генетического алгоритма для решения задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами // Вестник ТГТУ. 2008. №2. С.310-314.
- [9] Gupta, A., & Zhang, B. (2021). A review of machine learning applications in refinery planning and scheduling. Computers & Chemical Engineering, 145, 107175
- [10] Zyngier, D., Kelly, J.D. (2009) "Multi-Product Inventory Logistics Modeling in the Process Industries". in W. Chaovalitwongse, K.C. Furman and P.M. Pardalos (eds.), "Optimization and Logistics Challenges in the Enterprise" (p.61-95), USA: Springer.