

Деревянко Г.В.

System Technology Solutions, Германия

Мещеряков В.И.

Одесский государственный экологический университет

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ СЕТЕЙ

Представлено аналіз концепцій проектування тепло- і масообмінних мереж, які модулюють складні технічні системи з технологічними циклами нагріву й охолодження речовини. Підхід, що засновано на оптимізації, визначає основну парадигму сучасної постановки завдань проектування. При цьому методи вибору параметрів системи повинні володіти властивістю існування оптимуму, який повинен бути досяжним за прийнятних витрат машинного часу. Визначення глобального екстремуму необхідно не тільки у зв'язку з тим, що це найкраще з можливих рішень, але і тому, що локальний екстремум може привести до неправильних оцінок результатів розрахунків змінних моделі.

Прикладний розвиток моделей математичного програмування для різних систем, таких як реакторні мережі, системи дистиляції, тепло- і масообмінні мережі заводів і цехів, зумовлено тим, що ці моделі можуть використовуватися як базис для розвитку інструментарію автоматизованого проектування.

Незважаючи на безсумнівні переваги системного підходу вирішення завдання проектування, заснованого на HEN / MEN уявленнях, використовуваних спільно з принципами теорії оптимального проектування, наявна низка недоліків:

– формалізація завдання оптимального проектування є одним із найважливіших етапів роботи. Якість моделі не можна оцінювати ні за структурою, ні за формою;

– збільшення кількості елементів і зв'язків у системі та кількості змінних до десятків тисяч, а також кількість інтервалів дискретизації призводять до великих обчислювальних труднощів;

– збільшення розмірів проблеми призводить до складнощів під час аналізу лінійності та опуклості цільової функції, стійкості рішень;

– залежність вирішення завдань від початкових наближень, оскільки нелінійні проблеми оптимізації не забезпечують збіжність до глобального мінімуму.

Радикальним виходом із положення, що створилося, бачиться зміна парадигми рішення завдання проектування, що реалізує системний підхід і дає змогу отримати рішення, засноване на глобальному екстремумі.

Ключові слова: проектування, оптимізація, модель, обмеження, глобальний екстремум.

Введение. Значительное энергетическое потребление современных химических производств, жесткие требования к массе, габаритам летательных аппаратов делают актуальной проблему снижения энергетических, массогабаритных затрат. Одновременная оптимизация и синтез технологической схемы в общем случае обеспечивают более высокое качество по сравнению с традиционным проектированием.

Постановка проблемы. Теплообменные (HEN) и массообменные (MEN) сети получили распространение при проектировании сложных энергоемких систем химического назначения. Задача проектирования сепарационных сетей с принудительным нагревом (HISEN) определяет модель системы и вид сетей, объединяющих

тепло и массообменные аппараты. Автоматизированное проектирование основано на использовании методов линейного программирования (LP), смешанного целочисленного линейного программирования (MILP), нелинейного программирования (NLP) и смешанного целочисленного нелинейного программирования (MINLP).

Подход, основанный на теории оптимизации, определяет основную парадигму современной постановки задачи проектирования. Проблема оптимизации заключается в выборе такого критерия, значение которого соответствует экстремальному значению характеристического показателя качества функционирования системы. При наличии ограниченный процесс оптимизации становится более сложным, поскольку установленные

критерии оптимальности зависят от субъективно выбранных ограничений. Качество модели можно оценить лишь по достоверности полученных по модели прогнозов поведения реальной системы, а поскольку модель – лишь упрощенное описание объекта, то не существует и абсолютных критериев выбора наилучшей модели.

Постановка задачи. Целью работы является анализ существующих методов, математических концепций и проблем оптимизации автоматизированного проектирования тепло- и массообменных сетей промышленных энергетических систем.

Изложение основного материала исследования. В последние годы для анализа и синтеза различных систем широко используются их представление в виде тепло- и массообменных сетей (HEN/MEN), начало таким представлениям положено в работах [1; 2]. В анализируемой ниже литературе понятие HEN/MEN определяет модель системы в виде сетей, объединяемых тепло- или массообменными аппаратами. В рамках такой идеологии математическая структура программирования обычно формулирует HEN/MEN представления как задачу смешанного целочисленного нелинейного программирования – MINLP [3].

На первом этапе основной задачей, решаемой на основе такого подхода, являлся синтез процессов, происходящих в системе. Синтез процесса, как часть процесса проектирования, имеет целью развитие технологической схемы, реализующей процессы в системе [4].

В более поздних работах отмечается влияние как технологической схемы на выбор элементов, так и элементов на саму технологическую схему [5]. Как результаты, приведенные в [5], так и данные анализируемых ниже работ указывают, что синтез систем может быть корректно выполнен лишь совместно с проектированием ее элементов. Например, в [6], а позже в [7] было показано, что одновременная оптимизация и синтез технологической схемы в общем случае обеспечивают более высокое качество проектирования.

Идеология HEN/MEN [8–12] находит широкое применение при проектировании и синтезе систем в различных отраслях: в химической промышленности, пищевой промышленности, энергетике, при решении экологических проблем.

Синтез и проектирование химически активных (реактивных) колонн дистилляции [13–21]. В [17] разработали MINLP-модель для оптимального проектирования колонны химически активной (реактивной) дистилляции. Этот же подход

использован в [18] для моделирования системы синтеза метанола.

В [9; 19] рассмотрена задача оптимизации системы отбора отработанного тепла после ЦБК для обогрева городов Kuusankoski и Kouvola.

Синтез MEN широко применяется для решения экологических проблем. Так, например, MEN-представления использовались для решения такой специфической проблемы, как обработка фенола в сточных водах нефтеочистительного завода [20]. В [21] эти представления использовались при проектировании системы для окончательной очистки сточных вод предприятий. В [22] проведен анализ систем для удаления загрязнений из заводских стоков. В [23–26] рассмотрена задача проектирования сепарационных сетей с принудительным нагревом (HISEN). В этих работах удаление загрязнителей достигалось путём нагрева и охлаждения с последующим удалением примеси с использованием фазового перехода. В [27; 28] рассмотрена задача проектирования системы для удаления загрязнителей регулированием давления на мембранах. Более детальный анализ применимости HEN/MEN-идеологии при проектировании очистных сооружений можно найти, например, в работах [3; 19; 29–37].

В [38; 39] с помощью MILP-подходов проведена многопериодная оптимизация заводов, а в [40] предложена NLP-модель для проектирования химических производств.

Современная постановка задачи проектирования представляет собой поиск инженерного решения, опирающегося на понятие целевой функции. Такой подход, основываясь на теории оптимизации, определяет основную парадигму современной постановки задач проектирования.

Теория оптимизации в общем смысле представляет собой совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов [41]. Они ориентированы на нахождение наилучших вариантов решения проблемы из множества альтернатив и позволяют избежать полного перебора возможных вариантов.

Как правило, критерием выбора параметров системы является либо максимизация меры стоимости системы, либо минимизация меры затрат. При этом сами методы выбора параметров системы должны обладать таким свойством, что если оптимум существует, то он должен быть достижим при приемлемых затратах машинного времени [42].

Для того чтобы использовать математические результаты и численные методы теории опти-

мизации при решении конкретных инженерных задач, по мнению [41], необходимо:

установить границы подлежащей оптимизации инженерной системы;

определить количественный критерий, на основе которого можно произвести анализ вариантов с целью выявления «наилучшего»;

осуществить выбор внутрисистемных переменных, которые используются для определения характеристик и идентификации вариантов;

построить модель, отражающую взаимосвязи между переменными.

Предложенная в [41] либо подобная ей последовательность действий составляет содержание процесса постановки задачи инженерной оптимизации. Корректная постановка задачи служит ключом к успеху оптимизационного исследования и ассоциируется в большей степени с искусством, нежели с точной наукой. К сказанному добавим, что независимо от того, какой критерий выбирается при оптимизации, «наилучшему» варианту всегда должно соответствовать минимальное или максимальное значение характеристического показателя качества функционирования системы.

Уровень детализации при анализе и проектировании систем является наиболее существенным фактором, влияющим как на выбор целевой функции, так и на выбор переменных. При этом очень важно ввести в рассмотрение все основные независимые переменные. Однако не менее важно не «перегружать» задачу большим количеством мелких, несущественных деталей [41].

Абсолютное большинство инженерных задач, связанных с оптимизацией, формулируется при наличии ограничений. Такие ограничения существенно уменьшают размеры области, в которой проводится поиск оптимума. На первый взгляд может показаться, что уменьшение размеров допустимой области должно упростить процедуру поиска оптимума. Между тем, напротив, по мнению [41], процесс оптимизации становится более сложным, поскольку установленные критерии оптимальности нельзя использовать при наличии ограничений. Следствием этого является нарушение основного условия экстремальности, в соответствии с которым оптимум достигается в стационарной точке, с нулевым значением градиента [41].

Как отмечено выше, задача, к которой можно применить оптимизационные методы, должна включать критерий эффективности, независимые переменные, ограничения в виде равенств и неравенств, которые и образуют модель реальной

системы. Описание и построение модели реальной системы – это важнейший этап оптимизационного исследования, так как он определяет практическую ценность получаемого решения при его практической реализации [43]. Качество модели нельзя оценить ни по её структуре, ни по её форме. Единственным критерием такой оценки может служить лишь достоверность полученных на модели прогнозов поведения реальной системы [43]. Следует отметить, что соответствие модели реальной системе имеет в лучшем случае правдоподобный характер. Поскольку модель по своей сути не более чем упрощение действительности, то не существует абсолютных критериев, с помощью которых можно было бы однозначно выбрать наилучшую модель [43]. Кроме того, согласно [44], существует ошибочное мнение о том, что математические модели всегда требуют детализации и большого количества информации. По нашему мнению, модели можно лишь упорядочить по степени адекватности описания поведения реальной системы в представляющей интерес области изменения независимых переменных.

При проверке на адекватность моделей необходимо учитывать: во-первых, непротиворечивость математической основы модели, во-вторых, её соответствие законам математической логики и, в-третьих, её способность описывать исходную ситуацию [45]. Важно заметить то, что ответ на вопрос о том, успешно ли проходят предложенные модели проверку на адекватность, всегда остаётся в значительной степени субъективным.

Хорошо известно, что чаще всего целевая функция задачи может иметь несколько экстремумов. В этом случае наиболее желательным результатом решения задачи является определение глобального экстремума. Определение глобального экстремума желательно не только в связи с тем, что это лучшее из возможных решений задачи, но и потому, что локальный экстремум может привести к неправильным оценкам результатов расчетов по определению влияния переменных модели. Как один из возможных выходов из этой ситуации для максимально надежного определения глобального экстремума целевой функции в [43] рекомендуется применять несколько различных методов решения задачи.

Задача оптимизации технического проекта и анализ его формальной модели различны по своей природе. В анализе, вообще говоря, необходимо убедиться, что решение существует, а численные методы устойчивы. Помнению [42], если даже оптимальное решение существует, то т.к. численные

методы его построения зачастую оказываются довольно чувствительными к начальным приближениям, для сходимости итераций требуется значительное искусство вычислителя.

Наличие отмеченных проблем, связанных с объективной проверкой модели на адекватность, с надёжностью определения глобального экстремума и определения начальных приближений, указывает на то, что в задаче оптимизации технического проекта совершенно не гарантировано определение номинального проекта, а его выбор в рамках теории оптимального проектирования всегда остаётся за экспертом.

При построении математических моделей систем и их элементов часто используются термодинамические методы. Охарактеризуем некоторые из этих методов, используемых при построении HEN/MEN-представлений:

Nishio и др. [8; 46] разработали термодинамический подход для проектирования энергосистем с водяным паром, используемым в качестве рабочего тела. В этом случае применены эвристические правила, а сам подход ограничен циклами рабочего тела (водяного пара).

Chou и Shih [47] предложили подобный метод. Авторы разработали процедуру для проектирования заводских систем. Эта процедура определяет конфигурацию системы с максимально допустимой тепловой эффективностью.

El-Sayed и Evans [33] ввели концепцию термоэкономики. В этой концепции стоимость системы определяется ее эффективностью. Предложенная в [33] концепция расширяет традиционный термодинамический анализ, включая экономические соображения.

Важная часть термодинамических подходов сосредотачивается на анализе либо энтропии, либо эксергии энергосистем. Эти две концепции представлены в работах Kotas [48; 49] и Bejan [50]. Целью этих подходов, согласно Tsatsaronis и Moran [51], является идентификация и минимизация необратимости процессов с использованием дополнительных представлений эксергитического анализа, идентифицирующих преодолимые и неизбежные потери эксергии, введенные Tsatsaronis и Park [52].

Pinch-анализ – это методология [10; 53], используемая для проектирования сетей теплообменников с лимитированным потреблением тепловой энергии. Является фактом, что минимальные потребительские требования теплообменников в сетях могут быть определены только по потокам и минимальной разнице температур. Подобная кон-

цепция исследовалась для доменных печей ещё в 1927 году Reichardt [54; 55]. Аналогичная концепция было независимо создана Linnhoff [56] и его группой в UMIST. Весьма интересно, что этот метод разработали как инструментарий для анализа промышленных процессов, а не как инструмент в решении задачи проектирования. Кроме того, Pinch-метод использовался при пополнении систем новым оборудованием и процессами, как, например, в работе Townsend и Linnhoff [56; 57] при решении задачи проектирования.

Классическая термодинамика, предоставляя возможности для анализа рабочего тела внутри системы, не позволяет анализировать конструкцию элементов, чем сужает возможность поиска наилучших решений. Даже если в некоторых специальных случаях удаётся адаптировать термодинамические методы к анализу систем, общая проблема, связанная с определением наилучших решений с использованием термодинамических методов анализа, по мнению [32], в настоящее время остается открытой. По нашему мнению, основной проблемой термодинамических методов являются недостаточные возможности, предоставляемые проектировщику при выработке компромиссных решений.

Общая классификация математических моделей, основанных на HEN/MEN-представлениях, приведена в [44]:

1. Aggregated models. Эти модели для проектирования или синтеза систем используют упрощённую целевую функцию, определяемую доминирующими в задаче проблемами. Примеры Aggregated models включают:

а) модели для предсказания минимума потребления при минимальном количестве элементов в теплообменных [58] и массообменных сетях в условиях перегрузки [59];

б) набор ограничений, основанный на Pinch-методе [60];

в) модели процесса дистилляции для минимизации стоимости потребления [61];

г) реакторные сетевые модели для максимизации выходного продукта [62].

В [30] удалось выделить теоретическую структуру для построения Aggregated models. Однако, не смотря на усилия, предпринятые автором [30], модели такого типа всегда должны приспосабливаться к каждому специфическому случаю.

2. Short cut models. Модели такого типа относятся к корректно детализированным суперструктурам (т. е. представлениям о системе), включающим оптимизацию инвестиционной стоимости

и эксплуатационные расходы. Для уменьшения объема вычислений представления об элементах в таких моделях формулируются либо на основе относительно простой нелинейной модели, либо с использованием алгебраических соотношений. Эти предположения особенно важны при определении глобального экстремума. Примеры таких моделей включают:

а) модель синтеза теплообменных сетей [31; 53; 63];

б) модель последовательной дистилляции [64; 65];

с) модель технологических схем [66; 67].

3. Rigorous models. Модели такого типа представляют собой детализированные суперструктуры, включающие строгие и сложные модели, для описания элементов. Примерами таких представлений являются работы [68–70].

В последнее время нестрогие методы, такие как Simulated Annealing [71] и Genetic Algorithms [72], стали весьма популярными. Как отмечено в [44], эти методы не накладывают никаких допущений на функции, но они не могут гарантировать строгих решений, по крайней мере за конечное время. Заметим, что эти методы не используют процедурные методы поиска, а следовательно, не формулируют проблему как математическую задачу, допускающую алгоритмизацию. Кроме того, использование штрафных функций при определении нарушения ограничений снижает возможность применения этих методов.

Отметим, что Aggregated models приводят к более простым схемам решения задачи оптимизации. Часто это LP-, NLP- или MILP-модели небольшого размера, которые являются более простыми при решении, чем MINLP-модели. Как контраст [44], Short cut models и Rigorous models почти всегда приводят к MINLP-моделям. Важным обстоятельством является то, что, согласно имеемым литературным данным, по общему мнению, при практической реализации задач проектирования математическое программирование может быть приспособлено для моделей различной степени сложности [44]. Однако, согласно [32] и целому ряду других авторов, эта точка зрения может быть подвергнута сомнению, несмотря на то, что разработано много специализированных алгоритмов, не существует эффективного алгоритма для того, чтобы решить проблемы всех классов.

Тем не менее, хотя при решении задач оптимизации и возникают огромные проблемы, за последнее время удалось достичь существенного прогресса, связанного в первую очередь с мето-

дами решений MINLP-задач. Общий обзор методов оптимизации приведен в [73; 74]. Применение этих методов представлены в [75].

Выше отмечалось, что HEN/MEN-представления сводят задачу к проблемам целочисленного и нелинейного программирования. Приведём краткий обзор основных методов решения MINLP-проблем (более подробно см., например, в [73; 74]):

1. метод Branch and Bound (BB) см. [76–79]. Этот метод является прямым следствием предположения линейности исследуемой поверхности. В этом методе исключены NLP-подпроблемы, решаемые для каждого узла [44];

2. generalized Benders Decomposition (GBD) [80], и Outer – Approximation (OA) [60; 81–83] являются итерационными методами. В них рассматривается последовательность альтернативных NLP-подпроблем со всеми установленными логическими переменными и MILP-алгоритмы, предсказывающие новые значения для них;

3. extended Cutting Plane Method (ECP) [84] не решает NLP-подпроблем и полагается исключительно на последовательную линейризацию [44].

Общеизвестно [44], что все эти методы предполагают выпуклость целевой функции, обеспечивающую сходимость к глобальному экстремуму. Различие между GBD- и OA-методами находится в определении MILP-проблемы, возникающей при решении задач [44]. Отметим, что Outer – Approximation (OA) использует для логических переменных аккумулярованные линейризации функций, а Generalized Benders Decomposition (GBD) использует для логических переменных аккумулярованные параметрические функции Лагранжа. По мнению [44], LP/NLP-модели, использующие методы Branch and Bound [85], объединяют обе проблемы в пределах одного поиска [44]. По существу, в [44] формально показано, что нестрогие методы для невыпуклых целевых функций включают алгоритмы ослабления равенства, как указано в [86], и увеличивают влияние штрафных функций [87]. Сравнительный обзор этих методов имеется в [88].

Представляется важным отметить, что методы оптимизации, позволяющие определить глобальный экстремум, все еще остаются в области разработок.

Основным достоинством сетевых представлений процессов энергообмена в системах является возможность учета все большего числа факторов, влияющих на энерго- и ресурсосбережение ещё на этапе проектирования. Так, например,

применение подобных подходов в химической промышленности при вычислении минимума потребляемой энергии показывает ее существенное сбережение. Результаты многочисленных исследований Imperial Chemical Industries в Великобритании и Union Carbide в Соединенных Штатах указывают на возможность сбережения энергии от 30% до 50%, по сравнению с традиционной практикой проектирования [89]. В подтверждении этому в [19] указывается, что в промышленности имеется большой потенциал для создания более эффективных энергетических систем, использующих бросовое тепло для отопления городов.

Системный подход решает не только инженерные проблемы, связанные с энергосбережением, но и проблемы экологического взаимодействия с окружающей средой [32], а благодаря существенной экономии ресурсов проектируемых систем он увеличивает их экономическую эффективность [32].

Выводы. Из проведенного анализа становится очевидным, что математическое программирование стало основным методом процесса синтеза и проектирования систем. Прогресс в алгоритмизации и моделировании систем для решения различных типов задач оптимизации существенно продвинули эту область науки. Из обзора [44] ясно, что за последнее время произошло бурное развитие моделей математического программирования для различных систем, таких как реакторные сети, системы дистилляции, тепло- и массообменные сети, технологические схемы заводов и цехов. Все эти модели могут использоваться как базис для развития инструментария автоматизированного проектирования, что может эффективно помочь инженерам-проектировщикам. По прогнозу [44], в рамках будущих исследований ожидается, что новые достижения в глобальной оптимизации и целочисленном программировании будут иметь большое влияние на улучшение моделей оптимизации процесса синтеза и проектирования.

Несмотря на несомненные преимущества системного подхода решения задачи проектирования, основанного на HEN/MEN-представлениях, используемых совместно с принципами теории оптимального проектирования, рассмотренного в этом обзоре, абсолютное большинство авторов констатирует целый ряд недостатков, присущих ему:

1. Формализация задачи оптимального проектирования является одним из самых трудных этапов работы. При разработке модели стремятся к тому, что иногда называют «принципом оптимальной неточности»: модель должна быть настолько

детализирована, насколько это необходимо для целей исследования, для которых она была создана. Однако достичь этой цели всегда трудно [43]. Специалисты, обладающие одинаковым уровнем подготовки, рассматривая одну и ту же реальную задачу, могут предложить различные модели одной и той же системы. При этом ни одну из таких моделей независимо от степени ее детализации и сложности нельзя считать единственно «правильной». Модели можно лишь упорядочить по степени адекватности описания поведения реальной системы в представляющей интерес области эксплуатации. Качество модели нельзя оценивать ни по структуре, ни по форме. Единственным критерием такой оценки может служить достоверность полученных на модели прогнозов поведения реальной системы [43]. В [90] отмечается, что сложные системы с трудом поддаются формализованному описанию, а построенные для них модели – численному исследованию. В таком случае довольствуются моделями, которые представляют собой упрощенное описание физической реальности.

2. Вторая проблема, с которой сталкиваются исследователи, – это громоздкость задачи. Увеличение количества элементов и связей в системе, а следовательно, количества переменных, приводит к большим трудностям, которые могут преодолеваться только благодаря усиливающимся возможностям вычислительной техники и разработке более мощных программных комплексов. Так, например, в [19] для проверки выполнения системой всех её функций в течение года спроектированная сеть была протестирована на выполнимость LP-модели. Задача была разделена на 100 периодов, содержащих 41 509 уравнений и 32 409 переменных. Другой недостаток состоит в том, что математические формулировки задач часто базируются на большом количестве маленьких интервалов (это либо температурные интервалы, либо энтальпийные интервалы, либо и то и другое). При этом выяснилось, что даже для задач с умеренной размерностью количество интервалов может быть весьма большим, создавая тем самым соответствующую проблему при решении задачи оптимизации, вырастающей до неуправляемого размера [91–97].

3. Увеличение размеров проблемы приводит к сложностям при анализе целевой функции. Выше отмечалось, что в анализе необходимо убедиться, что решение существует, а численные методы устойчивы. Кроме того, в задаче оптимального проектирования не гарантировано существование номинального проекта [42]. По мнению [19; 32], недостатком MINLP-моделей является то, что

целевая функция не линейна и не выпукла, и поэтому решение обычно представляет собой локальный оптимум.

4. Одной из ключевых проблем в задаче проектирования является неопределенность результата решения задачи. Другими словами, является ли найденное решение глобальным экстремумом. Так, например в NLP-моделях находят глобальный экстремум, если проблема выпукла (т.е. выпукла целевая функция и ограничения) [44]. Там же отмечено, что при невыпуклой целевой функции NLP-модели не гарантируют нахождение глобального оптимума. Следует заметить, что нестрогие методы, такие как Simulated Annealing [71] и Genetic Algorithms [72], не делают никаких допущений на функции, но тогда, по мнению [44], они не могут гарантировать строгих решений. Анализ эвристических методов, представленный в [44], показывает, что хотя эти методы иногда ведут к хорошим проектным решениям, но с другой стороны они могут быть ненадежными [44]. В [42] отмечается, что математически точный экстремум может оказаться недостижимым а следовательно, может служить лишь ориентиром.

5. Практически во всех анализируемых работах отмечается существенная зависимость решения задач от начальных приближений. Например, нелинейные проблемы оптимизации всегда требуют хороших начальных приближений, и часто сходимость к глобальному минимуму не обеспечена. Хорошие отправные точки, требуемые в этих моделях, редко доступны [98; 99]. Если присутствует неудачное предположение, проблема может сходить к худшему решению или даже может быть не в состоянии обеспечить процесс сходимости [3]. В свою очередь, это приводит к тому, что формальная задача поиска экстремума требует значительного искусства в выборе начальных приближений. Другими словами, успех решения задачи проектирования во многом зависит либо от удачи, либо от опыта эксперта, оценивающего начальные приближения.

Перечисленные проблемы указывают, что наиболее радикальным выходом из создавшегося положения видится смена парадигмы решения задачи проектирования, реализующей системный подход и позволяющей получить решение, основанное на глобальном экстремуме.

Список литературы:

1. Yee T.F., Grossmann I.E., Kravanja Z. Simultaneous Optimization Models for Heat Integration – I. Area and Energy Targeting and Modeling of Multi – Stream Exchangers. *Comp. and Chem. Eng.* 1990. No. 14 (10). P. 1151–1164.
2. Yee T.F., Grossmann I.E. Simultaneous Optimization Models for Heat Integration – II. Heat Exchanger Network Synthesis. *Comp. and Chem. Eng.* 1990. No. 14 (10). P. 1165–1184.
3. Chakraborty S., Ghosh P. Heat exchanger network synthesis: the possibility of randomization. *Chemical Engineering Journal*. 1999. No. 72. P. 209–216.
4. Floudas C.A., Nonlinear and Mixed – Integer Optimization: Fundamentals and Applications. Oxford University Press, New York, 1995. 480 p.
5. Liporace F.S., Pessoa F.L.P., Queiroz E.M. The Influence of heat exchanger design on the synthesis of heat exchanger networks. *Braz. J. Chem. Eng.* Vol. 17. No. 4–7. São Paulo Dec. 2000. URL: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-66322000000400037>.
6. Duran M.A., Grossmann I.E. Simultaneous Optimization and Heat Integration of Chemical Processes. *AIChE J.* 1986. P. 32. 123 p.
7. Lang Y.D., Biegler L.T., Grossmann I.E. Simultaneous optimization and heat integration with process simulators. *Comp. Chem. Eng.* 1988. No. 12. 311 p.
8. Barbosa D., Doherty M.F. The Influence of Equilibrium Chemical Reactions on Vapor Liquid Phase Diagrams. *Chem. Eng. Sci.* 1988. No. 43 (3). 529 p.
9. Barbosa D., Doherty M.F. The Simple Distillation of Homogeneous Reactive Mixture. *Chem. Eng. Sci.* 1988. No. 43 (3). 541 p.
10. Okasinski M., Doherty M.F. Design Method for Kinetically Controlled, Staged reactive Distillation Columns. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1998. No. 37. 2821 p.
11. Bessling B., Schembecker G., Simmrock K.H. Design of Process with Reactive Distillation Line Diagrams. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1997. No. 36. 3032 p.
12. Venimadhavan G., Buzad G., Doherty M.F., Malone M.F. Effect of Kinetics on Residue Curve Maps for Reactive Distillation. *AIChE. J.* 1994. No. 40 (11). 1814 p.
13. Hauan S., Lien K.M. Phenomena Based Design Approach to reactive Distillation. *Chem. Eng. Res. Des.* 1998. No. 76. 396 p.
14. Ung S., Doherty M.F. Calculation of Residue Curve Maps for Mixtures with Multiple Equilibrium Chemical Reactions. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1995. No. 34. 3195 p.

15. Ung S., Doherty M.F. Synthesis of Reactive Distillation Systems with Multiple Equilibrium Chemical Reactions. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1995. No. 34. 2555 p.
16. Papalexandri K.P., Pistikopoulos E.N. Generalized Modular representation Framework for Process Synthesis. *AIChE J.* 1996. No. 42. 1010 p.
17. Ciric A.R., Gu D. Synthesis of Nonequilibrium Reactive Distillation Processes by MINLP Optimization. *AIChE J.* 1994. No. 40 (9). 1479 p.
18. Mirjana Kijevcanin et al. Energy and economy savings in the process of methanol synthesis using Pinch technology. *J. Serb. Chem. Soc.* 2004. No. 69 (10). P. 827–837. URL: <https://www.researchgate.net/publication/26402407>.
19. Juha Aaltola, Simultaneous Synthesis of Flexible Heat Exchanger Networks, Doctoral Thesis, Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering, Energy Engineering and Environmental Protection Publications, Espoo TKK – ENY – 12, 2003. URL: <http://lib.tkk.fi/Diss/2003/isbn9512263645/>.
20. El-Halwagi M.M., El-Halwagi A.M., Manousiouthakis V. Optimal design of Dephenolization Networks for Petroleum – Refinery Wastes. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 1992. No. 70. Part B. 131.
21. Kuo W.C.J., Smith R. Effluent Treatment System Design. *Chem. Eng. Sci.* 1997. No. 52 (23). 4273 p.
22. El-Halwagi M.M., Hamad A.A., Garrison G.W. Synthesis of Waste Interception and Allocation Networks. *AIChE J.* 1996. No. 42 (11). 3087 p.
23. Dye S.R., Berry D.A., Ng K.M. Synthesis of Crystallization – Based Separation Schemes. *AIChE Symp.* 1995. Ser. 91 (304). 238 p.
24. Richburg A., El-Halwagi M.M. A Graphical Approach to the Optimal Design of Heat – Induced Separation Networks for VOC Recovery. *AIChE Symp.* 1995. Ser. 91 (304). 256 p.
25. El-Halwagi M.M., Srinivas B.K., Dunn R.F. Synthesis of Optimal Heat Induced Separation Networks. *Chem. Eng. Sci.* 1995. No. 50. 81 p.
26. Dunn R.F., Zhu M., Srinivas B.K., El-Halwagi M.M. Optimal Design of Energy Induced Separation Networks for VOC Recovery. *AIChE Symp.* 1995. Ser. No. 90 (303). 74 p.
27. Srinivas B.K., El-Halwagi M.M. Optimal Design of Pervaporation Systems for Waste Reduction. *Comp. Chem. Eng.* 1993. No. 17 (10). 957 p.
28. El-Halwagi M.M. Synthesis of Optimal Reverse – Osmosis Networks for Waste Reduction. *AIChE J.* 1992. No. 38 (8). 1185 p.
29. Ashish Pattekar. Synthesis of Optimum Controllable Heat Exchanger Networks using Genetic Algorithms. *B. Tech. Project submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Technology in Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering Indian Institute of Technology Bombay* April 13.1999. 47 p.
30. Daichendt M.M., Grossmann I.E. A Preliminary Screening – Procedure for MINLP Heat – Exchanger Network Synthesis Using Aggregated Models. *Chemical Engineering Research and Design.* 1994. 72. P. 357–363.
31. Ciric A.R., Floudas C.A. Heat Exchanger Network Synthesis without Decomposition. *Computers and Chem. Eng.* 1991. No. 15. P. 385–396.
32. Tor – Martin Tveit A Systematic Procedure for Analysis and Design of Energy Systems, Doctoral Dissertation. *Helsinki University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Laboratory of Energy Engineering and Environmental Protection.* 2006. 69 p.
33. El-Sayed Y.M., Evans R.B. Thermoeconomics and the design of heat systems. *Trans. of ASME Journal of Engineering for Power.* 1970. No. 92, 1. P. 27–35.
34. Townsend D.W., Linnhoff B. Heat and power networks in process design. Part I: Criteria for placement of heat engines and heat pumps in process networks. *AIChE Journal.* 1983. No. 29. 5. P. 742–748.
35. Athier G., Floquet P., Pibouleau L., Domenech S. Synthesis of Heat Exchanger Networks by Simulated Annealing and NLP Procedures. *AIChE J.* 1997. No. 43. 3007 p.
36. Galli M.A., Cerda J. A Customized MILP Approach to the Synthesis of Heat Recovery Networks Reaching Specified Topology Targets. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1998. No. 37. 2479 p.
37. Linnhoff B., Hindmarsh E. The pinch design method of heat exchanger networks. *Chem. Eng. Sci.* 1983. No. 38. 745 p.
38. Hui C.W., Natori Y. An Industrial Application Using Mixed – Integer Programming Technique: A multi – period Utility System Model. *Comp. Chem. Eng.* 1996. No. 20. 1577 p.
39. Iyer R.R., Grossmann I.E. Optimal Multiperiod Operational Planning for Utility Systems. *Comp. Chem. Eng.* 1997. No. 21. 787 p.
40. Colmenares T.R., Seider W.D. Synthesis of Utility Systems Integrated with Chemical Processes. *Ind. Chem. Eng. Res.* 1989. No. 28. 84 p.
41. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. Книга 1. Москва : Изд. «Мир», 1986. С. 10–17, 196.

42. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное программирование. Москва : Изд. «Мир», 1983. С. 15–17, 251–252.
43. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. Книга 2. Москва : Изд. «Мир», 1986. С. 207, 208–209, 252–254.
44. Grossmann I.E., Caballero J.A., Yeomans H. Advances in Mathematical Programming for The Synthesis of Process Systems. *Latin American Applied Research*. 2000. No. 30. 26. P. 263–284.
45. Neumaier A. Mathematical Model Building, Chapter 3 in: Modeling Languages in Mathematical Optimization (J. Kallrath, ed.), Applied Optimization, Vol. 88, Kluwer, Boston 2004. URL: <https://www.mat.univie.ac.at/~neum/model.html>.
46. Nishio M., Itoh J., Shiroko K., Umeda T. A thermodynamic approach to steam power system design. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*. 1980. No. 19. 22. 2. P. 306–312.
47. Chou C.C., Shih Y.S. A thermodynamic approach to the design and synthesis of plant utility systems. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 1987. No. 26. 6. P. 1100–1108.
48. Kotas T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. *Krieger Publishing Company*. 1985. 23. 320.
49. Juan Cristóbal Torchia-Núñez, Jaime Cervantes-de-Gortari, Miguel Angel Porta-Gándara. Thermodynamics of a Shallow Solar Still Energy and Power Engineering. 2014. No. 6. 9. URL: [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjt55\)\)](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjt55))).
50. Bejan A. Entropy Generation Minimization – The Method of Thermodynamic Optimization of Finite – Size Systems and Finite – Time Processes. CRC Press, Inc., 1996. 400 p.
51. Tsatsaronis G., Moran M.J. Exergy – aided cost minimization. *Energy Conversion and Management*. 1997. No. 23. P. 38, 15–17, 1535–1542.
52. Tsatsaronis G., Park M.H. On avoidable and unavoidable exergydestructions and investment costs in thermal systems. *Energy Conversion and Management*. 2002. No. 43. P. 9–12, 1259–1270.
53. Lehr J., Keekey J. Alternative energy and shale gas encyclopedia. *Wiley series energy*. 2015. 878 p.
54. Reichardt P. Ein neues Warmeschaubild des Hochofens. *Archiv fur das Eisenhüttenwesen*. 1927. No. 4. P. 77–101.
55. Ebrahim M., Kawari Al. Pinch technology: an efficient tool for chemical-plant energy and capital-cost saving. *Applied Energy*. 2000. No. 65 (1–4). P. 45–49.
56. Townsend D.W., Linnhoff B. Heat and power networks in process design. Part II: Design procedure for equipment selection and process matching. *AIChE Journal* 29. 5 (September 1983). P. 748–771.
57. Ben-Guang Rong. Process Synthesis and Process Intensification. Walter de Gruyter, Berlin/Boston. 2017. 409 p.
58. Khezri S.M, Lotfi F., Tabibian S., Erfani Z.J. Application of water pinch technology for water and wastewater minimization in aluminum anodizing industries. *Environ. Sci. Tech.* 2010. No. 7 (2). P. 281–290.
59. Mian A., Ensinas A.V., Marechal F. Multi-objective optimization of SNG production from microalgae through hydrothermal gasification. *Computers & Chemical Engineering*. 2015. No. 76. P. 170–183.
60. Tareq A. Albahri, Cheng Seong Khor, Mohamed Elsholkami, Ali Elkamel. Optimal Design of Petroleum Refinery Configuration Using a Model-Based Mixed-Integer Programming Approach with Practical Approximation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2018. No. 507(22). P. 14.
61. Tran Trong Dao. Investigation on Evolutionary Computation Techniques of a Nonlinear System. *Hindawi Publishing Corporation Modelling and Simulation in Engineering Volume*. 2011. P. 21.
62. Belletante S., Montastruc L., Negny S., Domenech S. Optimal design of an efficient, profitable and sustainable biorefinery producing acetone, butanol and ethanol: Influence of the in-situ separation on the purification structure. *Biochemical Eng. J.*, 2016. No. 116. P. 195–209.
63. Xiao-Hong Wang, Yu-Gang Li. Stochastic GP synthesis of heat integrated nonsharp distillation sequences. *Chemical Engineering Research and Design*. 2010. Vol. 88. Issue 1. P. 45–54.
64. Buso A., Giomo M. Mathematical Modeling in Chemical Engineering: A Tool to Analyse Complex Systems. *Numerical Simulation of Physical and Engineering Processes*. 2011. P. 389–412.
65. Kravanja Z. Challenges in sustainable integrated process synthesis and the capabilities of an MINLP process synthesizer MipSyn. *Computers & Chemical Engineering*. Volume 2010. No. 34. 11. P. 1831–1848.
66. Turkay M., Grossmann I.E. Structural Flowsheet Optimization with Complex Investment Cost Functions. *Computers and Chemical Engineering*. 1998. No. 22. P. 673–686.
67. Shen P., Ma Y., Chen Y. A robust algorithm for generalized geometric programming. *Journal of Global Optimization*. 2008. Vol. 41. № 4. P. 593–612.
68. Fenggang Cui, Chengtian Cui, Jinsheng Sun. Simultaneous Optimization of Heat-Integrated Extractive Distillation with a Recycle Feed Using Pseudo Transient Continuation Models. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2018. No. 57 (45). P. 15423–15436.
69. Ignacio E., Grossmann Pío A., Aguirre Mariana Barttfeld. Optimal synthesis of complex distillation columns using rigorous models. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2004. No. 18. P. 53–74.

70. Pena J., Upegui A., Eduardo Sanchez, E. Particle swarm optimization with discrete recombination: An online optimizer for evolvable hardware. Proceedings of the 1st NASA/ESA conference on adaptive hardware and systems (AHS-2006), Istanbul, Turkey. 2006. P. 163–170.
71. Jason H. Moore, Lance W. Hahn, Marylyn D. Ritchie, Tricia A. Thornton, Bill C. White. Application of Genetic Algorithms to the Discovery of Complex Models for Simulation Studies in Human Genetics. *Proc Genet Evol Comput Conf. 2002.* 2002. P. 1150–1155.
72. Hendrix E., Casado L., Amaral P. Global Optimization Simplex Bisection Revisited Based on Considerations by Reiner Horst. *International Conference on Computational Science and Its Applications.* 2012. P. 159–173.
73. Pinter J. Global optimization: software, test problems, and applications. Handbook of global optimization. 2002. Vol. 2. P. 515–569.
74. Xue-Ping Hou, Pei-Ping Shen, Chun-Feng Wang. Global Minimization for Generalized Polynomial Fractional Program. *Mathematical Problems in Engineering.* 2014. P. 12.
75. Bonami P., Lee J., Leyffer S., Wachter A. More Branch-and-Bound Experiments in Convex Nonlinear Integer Programming. *Argonne National Laboratory. Illinois.* 2011. 34 p.
76. Grossmann I. Review of Nonlinear Mixed-Integer and Disjunctive Programming Techniques. *Optimization and Engineering.* 2002. No. 3. P. 227–252.
77. Vinel A., Krokhmal P.A. Mixed integer programming with a class of nonlinear convex constraints. *Discrete Optimization.* 2014. No. 24. P. 66–86.
78. Fourer R. On the Evolution of Optimization Modeling Systems. In Grötschel, M. ed. *Documental Mathematical. Extra Vol. "Optimization Stories".* 2012. P. 377–388.
79. Oliveira R.M., Paulo A., Ferreira V. Global Optimization of Convex Multiplicative Programs by Duality Theory. *Global Optimization and Constraint Satisfaction.* 2003. Vol. 3478. P. 101–111.
80. Grossmann I.E., Aguirre P.A., Bartfeld M. Optimal synthesis of complex distillation columns using rigorous models. *Computers and Chemical Engineering.* 2005. No. 29. P. 1203–1215.
81. Abhishek K., Leyffer S., Linderoth J. FILMINT: An Outer-Approximation-Based Solver for Nonlinear Mixed Integer Programs. *Argonne national laboratory. Illinois.* 2008. 30 p.
82. Lee S., Grossmann I.E. Logic-Based Modeling and Solution of Nonlinear Discrete/Continuous Optimization Problems. *Annals of Operations Research.* 2005. No. 139. Issue 1. P. 267–288.
83. Buchheim C., Trieu L. Quadratic Outer Approximation for Convex Integer Programming with Box Constraints. *International Symposium on Experimental Algorithms. SEA 2013: Experimental Algorithms.* 2013. P. 224–235.
84. Zhiyong Fang, Xueqiang Gu, Jing Chen. Improved Heuristic Flower Pollination Algorithm for Solving Multi-Dimensional Knapsack Problems. *10th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA).* 2017. P. 33–38.
85. Kravanja S., Šilih S., Kravanja Z. The Multilevel MINLP Optimization Approach to Structural Synthesis: the Simultaneous Topology, Material, Standard and Rounded Dimension Optimization. *Advances in Engineering Software.* 2005. Vol. 36. No. 9. P. 568–583.
86. Guoqing Li, Yushu Luo, Yong Xia, Ben Hua. Improvement on the Simultaneous Optimization Approach for Heat Exchanger Network Synthesis. *Industrial & Engineering Chemistry Research.* 2012. No. 51 (18). P. 6455–6460.
87. Exler O., Schittkowski K. A trust region SQP algorithm for mixed-integer nonlinear programming. *Optimization Letters.* 2007. Vol 1. Issue 3. P. 269–280.
88. Ugray Z., Lasdon L., Plummer J., Glover F., Kelly J., Martí R. Scatter search and local NLP solvers: A multistart framework for global optimization. *INFORMS Journal on Computing.* 2007. No. 19 (3). P. 328–340.
89. Schaschke C. A Dictionary of Chemical Engineering Oxford Quick Reference. OUP Oxford. 2014. 191 p.
90. Pavao L.V., Miranda C.B., Costa C.B., Ravagnani M.A. Efficient multiperiod heat exchanger network synthesis using a meta-heuristic approach. *Energy.* 2018. Vol. 142. P. 356–372.
91. Rathjens M., Fieg G. Design of Cost-Optimal Heat Exchanger Networks Considering Individual, Match-Dependent Cost Functions. *Journal of the Italian Association of Chemical Engineering.* 2018. Vol. 75. P. 601–606.
92. Massimo Maiorano M., Aiorano Enrico Sciubra. Heat Exchangers Networks Synthesis and Optimization Performed by an Exergy-Based Expert Assistant. *Int.J. Applied Thermodynamics.* 2000. Vol. 3. № 1. P. 1–19.
93. Subramanian A., Gundersen T., Adams T. Modeling and Simulation of Energy Systems: A Review. *Processes.* 2018. No. 6. P. 238.
94. Tor-Martin Tveit. A systematic procedure for analysis and design of energy systems. Helsinki University of Technology, 2006. 70 p.
95. Jiang J., Ding G., Zhang J., Zou Y., Qin S. A Systematic Optimization Design Method for Complex Mechatronic Products Design and Development. *Mathematical Problems in Engineering.* 2018. P. 14.
96. Sojitra R. Application Algorithm Development of Pinch Technology in Heat Integration Problem. *J. of Chemical Engineering & Process Technology.* 2016. No. 4.

97. Smith R., Jobson M., Chen L. Recent Development in the Retrofit of Heat Exchanger Networks. *Applied Thermal Engineering*. Elsevier. 2010. No. 30 (16). P. 2281.

98. Ma J., Chen X., Chang C., Wang Y., Feng X., Simultaneous Synthesis of Multi-Period Heat Exchanger Networks for Multi-Plant Heat Integration., *Chemical Engineering Transactions*. 2017. No. 61. P. 757–762.

99. Yin Ling Tan, Denny K.S., Mahmoud M. El-Halwagi, Dominic C.Y. Foo, Yudi Samyudia. Floating pinch method for utility targeting in heat exchanger network (HEN). *Chemical Engineering Research and Design journal homepage*. 2013. No. 8.

Derevjanko G.V., Mescherjakov V.I. ANALYTICAL REVIEW OF SYSTEMS OF DESIGNING HEAT AND MASS EXCHANGE NETWORKS

The analysis of design concepts for heat and mass transfer networks simulating complex technical systems with technological cycles of heating and cooling a substance is presented. An optimization-based approach defines the main paradigm of the modern formulation of design problems. Moreover, the methods for choosing the system parameters should have such a property that an optimum exists and should be achievable at an acceptable cost of computer time. The determination of a global extremum is necessary not only because it is the best possible solution, but also because a local extremum can lead to incorrect estimates of the results of calculations of model variables.

The applied development of mathematical programming models for various systems, such as reactor networks, distillation systems, heat and mass transfer networks, technological schemes of factories and workshops, is due to the fact that these models can be used as a basis for the development of computer-aided design tools.

Despite the undoubted advantages of a systematic approach to solving a design problem based on HEN / MEN representations used in conjunction with the principles of optimal design theory, there are a number of disadvantages:

– formalization of the optimal design problem is one of the most difficult stages of work. The quality of the model cannot be evaluated either in structure or in form;

– an increase in the number of elements and connections in the system and the number of variables up to tens of thousands, as well as the number of sampling intervals, leads to great computational difficulties;

– increasing the size of the problem leads to difficulties in analyzing the linearity and convexity of the objective function, the stability of solutions;

– the dependence of the solution of problems on the initial approximations, since nonlinear optimization problems do not ensure convergence to a global minimum.

A radical way out of this situation is a paradigm shift in solving the design problem, which implements a systematic approach and allows us to obtain a solution based on a global extremum.

Key words: design, optimization, model, constraints, global extremum.