

УДК 66.011; 661.717.5

А.А. Димитров, О.Ю. Яковлева, М.Г. Хмельнюк

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Дворянская, 1/3, Одесса, 65082

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В данной статье приведен обзор и анализ существующих методов и способов повышения энергетической эффективности технологических объектов при их реконструкции либо на стадии проектирования. Рассмотрены различные типы производственных объектов, относящихся к химической, нефтехимической отраслям, отраслям минеральных удобрений, металлургии черных и цветных металлов, целлюлозной и лесохимической, строительных материалов, пищевой, химико-фармацевтической, переработки сельскохозяйственной продукции и различных процессах биотехнологии, а также теплоэнергетике.

Ключевые слова: Энергопотребление – Термодинамический анализ – Эксергия – Пинч-анализ – Составная кривая – Технологический объект – Системный анализ – Эмерджентность системы – Интерэктность системы

О.О. Дімітров, О.Ю. Яковлєва, М.Г. Хмельнюк

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

У даній статті наведено огляд і аналіз існуючих методів і способів підвищення енергетичної ефективності технологічних об'єктів при їх реконструкції або на стадії проектування. Розглянуто різні типи виробничих об'єктів, віднесених до хімічної, нафтохімічної галузей, галузей мінеральних добрив, металургії чорних та кольорових металів, целюлозної та лісохімічної, будівельних матеріалів, харчової, хіміко-фармацевтичної, переробки сільськогосподарської продукції і різноманітних процесах біотехнології, а також теплоенергетиці.

Ключові слова: Енергоспоживання – Термодинамічний аналіз – Ексергія – Пінч-аналіз – Складова крива – Технологічний об'єкт – Системний аналіз – Емерджентність системи – Інтеректність системи

A. Dimitrov, O. Yakovleva, M. Khmelniuk

Odessa national academy of food technology, 1/3, Dvoryanskaya str., Odessa, 65082

IMPROVING OF THE TECHNOLOGICAL OBJECTS ENERGY EFFICIENCY

In this paper the overview and analysis of existing methods and ways of improving the technological plants' energy efficiency in time of their reconstruction or design process are conducted. The different types of industrial plants are discussed. The ways of industry are chemical, petrochemical, mineral fertilization, metallurgy of black and colored metals, cellulose and wood-chemical, construction materials, food, chemical and pharmaceutical, agricultural products processing and different biotechnological processes and heat and power engineering as well.

Keywords: Energy consumption – Thermodynamic analysis – Exergy – Pinch-analysis – Compound curve – Technological objects – System analysis – System emergentness – System interactness

I. ВВЕДЕНИЕ

За 2008 год мировым промышленным сектором было потреблено около 98 эксаджоулей (ЭДж) энергии, что составило 28% суммарного мирового потребления энергии. В 2010 году всемирный рост энергопотребления достиг 5,6%, это – самый высокий показатель с 1973 года. В 2011 году рост мирового энергопотребления превысил экономический рост [1].

Стоит отметить, что промышленные объекты являются крупнейшими потребителями энергоресурсов как в виде сырья, так и в виде энергии, переходящей в различные формы, необходимые для

осуществления производственных процессов. Однако, кроме этого, большинство технологических систем обладают внутренним теплом проходящих в них экзотермических процессов, а также вторичных энергетических ресурсов.

Как часть попытки уменьшить потребление конечных ресурсов в глобальном масштабе, инженеры попытались уменьшить расход энергии при увеличении объема промышленного производства в различных отраслях. В последние годы роль повышения эффективности использования энергии производственных процессов стала еще более важной, являясь ключевым звеном в цепи снижения мирового энергопотребления.

В последнее время добавились два фактора, придающие особое значение экономии энергии в Украине и в ряде стран бывшего СССР и расширяющие диапазон используемых для этих целей средств и методов.

Первым фактором является постоянный рост цен на энергоносители. Большинство объектов были спроектированы и построены во времена низких цен на энергоносители и, таким образом, работают не в оптимальном режиме с точки зрения потребления энергии.

Второй фактор – уменьшение темпов роста производства, либо его снижение.

Общей чертой всех производственных процессов является то, что между сырьем и конечным продуктом зачастую находится множество функционально различных стадий и ступеней переработки. Эти стадии могут отличаться весьма в широком диапазоне параметров: от высоких температур до ультранизких, при высоком давлении и при низком. Однако, несмотря на их качественную и количественную неоднородность, все технологические процессы обладают одинаковыми свойствами, а именно: перерабатывают вещество и энергию, являются структурно сложными и взаимодействуют с внешней средой.

Среди разнообразия свойств процессов, протекающих в технологических объектах, различают два основных свойства, присущие всем этим объектам – свойство интерэктности и эмерджентности. Первое характеризует наличие взаимосвязанных и взаимодействующих частей, а второе – способность порождения новых интегративных свойств, присущих только целой системе.

Исследование свойств интерэктности и эмерджентности позволяет в полной мере применять методы системного анализа для получения наибольшего эффекта при рационализации работы действующих и проектируемых заводов.

Для достижения наилучшей производительности и наименьшего при этом потребления энергетических ресурсов технологическими объектами, появляется резкая необходимость определения методов анализа этих объектов с целью выявления их свойств и дальнейшего повышения их эффективности. Данные методы должны иметь возможность применения при анализе различных по своей структуре типов производств, при этом, учитывая свою универсальность, давать на выходе как можно более точные результаты.

Данная статья представляет собой определение рациональных методов анализа технологических объектов при наличии ряда существенных барьеров, которые, тем или иным образом, негативно влияют на использование существующих методов и ставят под сомнение их универсальность.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В большинстве случаев, определение способов повышения эффективности технологических систем различного назначения сводится к исследо-

ванию и выбору их оптимальной структуры и элементов. Как показывают многочисленные исследования, экономический эффект от оптимальной структуры технологической системы на порядок выше, чем эффект от оптимальной организации ее отдельных элементов. Этот факт очень важно принимать во внимание при реконструкции действующих производств, так как зачастую основным мероприятием при реконструкции является усовершенствование лишь отдельных аппаратов и машин.

Процесс поиска оптимальной схемы технологической системы представляет собой комбинаторную задачу, то есть перебор огромного количества возможных вариантов схемного решения. Например, при синтезе системы теплообменников, состоящей из 25 холодных и горячих потоков, существует 10^{117} различных вариантов структуры или, например, для разделения смеси из 18 компонентов на отдельные компоненты в системе главных колонн существуют около 25 миллионов различных структур [2]. Такой диапазон различных вариантов создает значительные затруднения при решении задачи выбора оптимальной технологической системы.

Следовательно, становится крайне необходимым выделять все больше новых принципов и подходов к анализу и синтезу ТС. Современный анализ выделяет два основных направления. Первое предусматривает применение строгих алгоритмических методов для решения сложных задач, а второе связано с решением задач эвристическим методом. Последние зачастую дают неоднозначные результаты. Хотя, оба направления имеют как свои преимущества, так и недостатки.

Алгоритмические методы анализа, в свою очередь, подразделяются на интегральные и декомпозиционные. При интегральных методах каждый процесс и аппарат описывается математически. Такие методы обычно очень сложны и громоздки, а полученные таким образом результаты подлежат дальнейшей обработке и упрощению.

Декомпозиционные методы анализа предусматривают последовательный расчет каждого аппарата или процесса отдельно, таким образом получая расчет всех ТС. Очевидно, что методы анализа данного типа не в состоянии учесть свойство эмерджентности системы. Также отметим, что существуют и различные комбинации перечисленных методов.

Недостатков, присущих описанным ранее методам, можно избежать, если взять во внимание следующие свойства, которыми должны обладать рациональные методы анализа ТС. Такие методы должны требовать минимальное количество входных данных для анализа, а на выходе давать простые структуры, должны также предусматривать возможность учета и задания различных свойств ТС (то есть наличие связи «машина-человек»).

Методом, отвечающим этим требованиям и учитывающим рассмотренные ранее проблемы,

может быть «Пинч-анализ». Данный метод появился в середине 70-х годов прошлого века, но особенно интенсивно он стал развиваться в последнее десятилетие.

Любая технологическая система состоит из двух типов потоков, первые требуют охлаждения перед дальнейшей обработкой (горячие потоки), а вторые – нагревания (холодные потоки).

В пинч-анализе принято изображать такие потоки в виде зависимости изменения энтальпии от температуры, то есть с помощью диаграмм T-h (рисунок 1). Так как энтальпия горячих технологических потоков уменьшается с уменьшением температуры (они охлаждаются), эти потоки изображаются в виде вектора, направленного справа-налево, в то время, как холодные потоки изображают слева-направо вследствие возрастания энтальпии потока при его нагревании горячей утилитой.

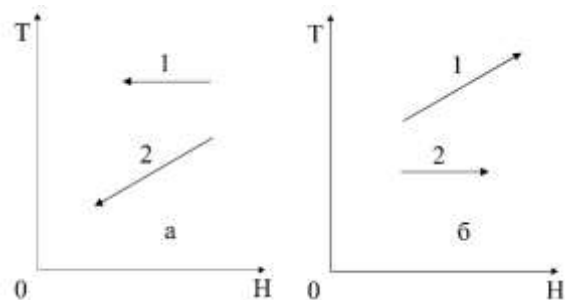


Рисунок 1 – Представление горячих и холодных потоков в T-h диаграмме

С помощью пинч-технологии анализируют возможность использования внутренних ресурсов технологической системы, то есть возможность рекуперации теплоты. Рекуперация позволит значительно сократить потребление энергии утилитами, что приведет к существенной экономии энергопотребления технологической системы. Кроме того, мероприятия по модификации схемы ТС для максимальной рекуперации позволяют, как показал опыт, получать более рациональные схемные решения.

На температурно-энтальпийной диаграмме возможность рекуперации можно проанализировать, измерив область перекрытия двух потоков, то есть тот диапазон энтальпии, в который входят и горячий, и холодный потоки.

Если представить несколько горячих (или холодных) потоков на одной температурно-энтальпийной диаграмме, то их начальные и конечные температуры будут делить температурную ось на несколько интервалов. Однако, если совместить эти потоки, то можно получить так называемую составную кривую горячих (или холодных) потоков. Вся составная кривая перекрывает такой диапазон изменения энтальпии, какой перекрывали все отдельные горячие (или холодные) потоки, а точки излома составной кривой соответствуют начальным и конечным температурам разделенных потоков.

Для заданного ΔT_{min} расположение составных кривых всегда будет приводить к максимальному перекрытию и, следовательно, к максимальной ре-

куперации. Те части составных кривых, которые находятся вне зоны перекрытия показывают тепловую энергию, которую необходимо либо подвести от горячих утилит, либо отвести холодными утилитами. Для того, чтобы рекуперировать тепловую энергию горячего потока, он должен быть нарисован выше холодного потока во всех точках интервала энтальпий.

Разность температур ΔT_{min} может быть изменена путем перемещения составной кривой холодных потоков вдоль оси энтальпии. При этом будет изменяться область перекрытия, а соответственно, будет изменяться нагрузка на утилиты.

При проведении пинч-анализа ключевой задачей становится определение наиболее оптимальной температуры ΔT_{min} . Становится известным, что при увеличении ΔT_{min} способность системы к рекуперации уменьшается, однако и уменьшается общая площадь теплообменной поверхности рекуперативных теплообменников. Следовательно, снижаются и капитальные вложения в оборудование такой системы. В другом случае, уменьшение ΔT_{min} ведет к увеличению способности к рекуперации, а также к увеличению общей площади теплообменной поверхности, что обуславливает резкое повышение капитальных вложений.

Из вышесказанного следует заключение, что при исследовании ТС методом пинч-анализа важно учитывать изменение ΔT_{min} , которые возможно осуществить.

Приведем примеры повышения эффективности работы технологических систем после применения пинч-анализа в различных областях промышленности.

Так, например, в «Union Carbide» после применения пинч-технологии в нефтехимической отрасли была получена экономия за счет снижения энергетических затрат в размере 1,05 млн долларов при окупаемости проекта 6 месяцев, а в «ICI» в отрасли специальной химии экономия составила 1,6 млн долларов. В пищевой промышленности были достигнуты результаты в 35% экономии общей энергии, а в полимерной промышленности – 25% экономии плюс увеличение производительности [2].

Среди других направлений анализа технических систем особое внимание уделяется методом термодинамического анализа. Они проводятся на основе уже известных заранее термодинамических параметров системы, получаемых либо в эксперименте, либо расчетным путем. При этом число этих параметров должно быть таким, чтобы для исследуемой системы можно было составить материальный, энергетический и эксергетический балансы. Эксергетический баланс завершает систему уравнений и основан на первых двух.

Методы термодинамического анализа, основанные на использовании второго закона термодинамики, позволяют оценить предельно возможные энергетические показатели любых установок, соответствующие случаю обратимого протекания всех процессов. Они позволяют определить сте-

пень термодинамического совершенства отдельных процессов, а в некоторых случаях и указать пути совершенствования установки.

Метод, получивший название эксергетического, получил довольно широкое распространение, что обусловлено его общностью, а именно, возможностью применения для анализа разомкнутых процессов.

В качестве примера области применения эксергетического анализа могут быть теплоэнергетические и холодильные установки различного назначения. В общем случае любой элемент такой установки обменивается с другими телами теплотой, механической энергией и потоками вещества. Эксергия теплоты (ее максимальная работоспособность) определяется по формуле:

$$E_Q = Q \frac{T - T_0}{T},$$

где Q – количество теплоты; T – температура тела, у которого эта теплота отнимается; T_0 – температура окружающей среды.

Задачей эксергетического метода является отделение определенной части установки от остальных условными граничными сечениями и определение потоков эксергии через эти сечения. Затем рассчитывается эксергетический КПД данного элемента:

$$\eta_i = \frac{E_{ik}}{E_{in}},$$

где E_{in} – левое граничное сечение, а E_{ik} – правое граничное сечение. Также определяется и потеря эксергии в этом элементе:

$$P_i = E_{in} - E_{ik} = (1 - \eta_i)E_{in}$$

Таким образом, получают довольно обширные результаты относительно потерь в каждом элементе установки, что позволяет в дальнейшем давать рекомендации конструктору о повышении эффективности работы этого элемента. Применяя метод эксергетического анализа, представляется также возможным определить, в каком элементе установки имеют место наибольшие потери, а также, какими факторами они обусловлены.

Как отмечалось ранее, эксергетический метод анализа получил широкое распространение главным образом благодаря возможностям анализа разнообразных установок, в том числе и работающих по разомкнутым схемам и с химическими превращениями рабочих тел (что имеет непосредственное отношение к химико-технологическим системам).

Эксергетический метод анализа применяется для решения двух основных задач. Первая – установление максимальной термодинамической эффективности и вычисления потерь эксергии в результате необратимости процессов и циклов. При решении задач этой категории эксергетический метод полностью справляется с определением общей степени совершенства, он дает возможность численного определения потерь в отдельных узлах установки. А иногда удается при его помощи определить условия, соответствующие минимуму потерь как в отдельных частях установки, так и во всей установке в целом. Вторая – обоснование ре-

комендаций по их совершенствованию. Эти рекомендации связаны с указанием тех элементов, где потери имеют наибольшее значение. Однако, они не могут быть вполне объективными из-за недоучета взаимосвязи потерь в отдельных процессах и их влияния на общее совершенство установки. Также, необходимо учитывать и тот факт, что потери относятся к тому элементу, для которого их вычислили, а не к смежному, где они зародились.

Как уже отмечалось ранее, каждый из описанных методов анализа имеет как свои преимущества, так и недостатки. Например, преимущество пинч-анализа в том, что можно представить информацию об исследуемой системе на простых диаграммах (в виде составных кривых, большой составной кривой), таким образом, на ранних стадиях проектирования является возможным проследить эффективность будущей системы. Что касается эксергетического метода анализа, то здесь необходимо отметить, что его преимущество заключается в том, что он может быть применен как к технологическим системам (с химическими превращениями внутри системы), так и к любым теплоэнергетическим и холодильным установкам, при этом можно эффективно определить наиболее рациональные их модификации.

Объединив положительные стороны обоих методов, можно получить совершенно новую методику, в ходе которой все части системы возможно представить на одной диаграмме и, таким образом, провести анализ потерь. Очевидно, что основным ограничением пинч-анализа является то, что он применим исключительно к процессам теплопередачи, а процессы, в которых происходит изменение давления или состава рабочего вещества, таким методом проанализированы быть не могут, хотя процессы именно такого типа являются наиболее частыми в теплоэнергетических и химико-технологических системах.

Для того, чтобы избежать данное ограничение, Feng и Zhu [3] предложили ввести универсальную диаграмму Ω - H , где Ω указывает на энергетический уровень, а H – на количество энергии. На этой диаграмме можно представить энергетические и эксергетические балансы для всей системы в целом. В ней объединены основные преимущества как пинч-анализа, так и эксергетического анализа. Так как диаграмма позволяет рассмотреть и проанализировать всю систему целиком и определить неэффективные процессы и оборудование, следовательно, можно получить совершенно новые модификации исследуемой системы, применяя концепцию неизбежных и преодолимых эксергетических потерь. Анализ преодолимых потерь указывает на максимальные потенциалы, которые являются целью повышения эффективности и которые достижимы в текущих технических и экономических условиях.

Составные кривые пинч-анализа также могут быть преобразованы, если будут построены в диаграмме η_c - H (степень термодинамического совершенства и энтальпии). Такие составные кри-

вые будут носить название эксергетических составных кривых. Такая комбинация, хотя, и позволяет получить данные об эффективности системы, но вследствие того, что на диаграмме η - H невозможно построить основные процессы (такие, как, к примеру, расширение в турбине или сжатие в компрессоре). Это ограничение становится причиной неполного определения потерь в рассматриваемой системе, так как именно основные процессы оказывают на систему наибольшее влияние. Это ограничение, однако, снимается путем использования диаграммы Ω - H , в которой возможно построение всей системы в целом. Поэтому, все существующие потери могут быть с необходимой точностью определены.

Для того, чтобы определить максимальный потенциал, который можно достичь при усовершенствовании системы, потери эксергии разделяют на два вида – неизбежные и преодолимые потери. Неизбежные потери эксергии определяются, как минимальные потери, которых нельзя избежать при осуществлении процесса. Второй же вид потерь эксергии показывает практический максимальный потенциал для совершенствования процесса или системы в целом. Задачей комбинированного пинч-эксергетического метода и является анализ преодолимых потерь эксергии, имеющих место в различных процессах и оборудовании.

Отметим также, что комбинированный метод может выполняться в три стадии. Результаты первой стадии дают общие рабочие характеристики теплообменной системы и указывают на процессы, эффективность которых значительно меньше остальных. Вторая стадия учитывает основные процессы и требует больше данных для построения распределения потерь эксергии основных процессов. Данная стадия оценивает целую систему, включая подсистемы, более подробно. В результате могут быть определены потери, характерные для всей системы в целом. Наконец, третья стадия анализа основана на концепции преодолимых и неизбежных потерь [3] эксергии, с помощью которых определяются модификации процессов и системы в целом, а также решение для их дальнейшего совершенствования.

Положительным моментом такой трехуровневой методики анализа заключается в том, что проектировщик сам может решить, на какой стадии нужно остановиться. Если результат первой стадии показывает высокую эффективность протекающих в системе процессов, может стать ненужным идти далее и закончить анализ. В другом случае, вторая стадия может быть необходима для более подробного анализа, следовательно, станет возможным определить процесс и оборудование, обладающие наибольшими потерями эксергии.

Развитие современной техники предусматривает появление все более совершенных программных продуктов для выполнения анализа технологических систем и процессов с помощью различных методов. В настоящее время лучшими в мире системами технологического моделирования считаются PRO-2 и HYSYS, однако существует и ряд

других, более простых и менее универсальных систем моделирования.

Система PRO-2 считается наиболее мощной и развитой в мире. Среди ее достоинств можно выделить следующие пункты: в систему включены все виды оборудования и все известные в мире методики расчетов; она позволяет добавлять собственные алгоритмы (хотя и имеет в качестве встроенного языка давно устаревший язык ФОРТРАН); Windows-версия существенно облегчила работу с системой. Из недостатков системы выделяются ее сложность и то, что в качестве пользователя необходим высококвалифицированный специалист, а также отсутствие русификации.

Говоря о системе HYSYS, которая, кстати, является Windows-приложением, можно выделить следующие достоинства: является полностью интегрированной и позволяет моделировать сложные схемы с сетями трубопроводов, установками подготовки и переработки и т. д. Система HYSYS представляет возможность моделирования вложенной иерархической структуры схем, что является важным для увязки функционирования отдельных производств в масштабе завода. Среди всех остальных систем, именно HYSYS обладает наиболее удобным интерфейсом, а выходные файлы могут быть с легкостью интегрированы в Excel.

В 1990-х годах коллективом специалистов ВНИИГАЗа была начата разработка системы GIBBS, которая является очень похожей на DOS-версию HYSYS (интерфейс точно так же построен на электронных таблицах). Основным достоинством Windows-версии является возможность конструктивного и гидравлического расчета трубопроводов и присутствующих в модели аппаратов. К недостаткам можно отнести отсутствие выбора методик расчета и невозможность варьирования задаваемыми для расчетов переменными (невозможность решения задач регулирования и оптимизации) [4].

III. ВЫВОДЫ

На сегодняшний день задача повышения эффективности технологических и теплоэнергетических процессов приобрела еще более актуальный характер. В связи с этим, постоянно происходит поиск новых методик анализа систем и процессов, а также совершенствуются уже известные методики. Каждая методика должна отвечать определенным требованиям и иметь возможность быть внедренной в различные области производства.

Среди таких методов наиболее полно отвечают требованиям современные методы эксергетического и пинч-анализа, причем как первый, так и второй метод, дают достаточно объективный результат, по которому можно судить не только о наличии потерь в процессах или аппаратах, но и выявить их причину.

В последнее время получил развитие комбинированный пинч-эксергетический метод анализа систем различных областей промышленности. Его появление позволило избежать тех недостатков и ограничений, которыми обладали методы эксергетического и пинч-анализа по отдельности. Прогнозируя дальнейшее развитие данного метода, можно отметить, что именно он может стать основой современного анализа и расчета сложных технологических и энергетических систем не только в мире, но и в Украине. Так как большинство технологических объектов Украины являются на сегодняшний день низкоэффективными, становятся необходимыми меры по повышению их эффективности. Учитывая то, что в состав таких объектов входят установки, имеющие различные схемы и работающие по разным циклам, внедрение и дальнейшее совершенствование методов пинч-эксергетического анализа применительно к объектам Украины является целесообразным, что позволит существенно повысить их эффективность, рационально провести реконструкцию уже имеющихся, а также выполнить проектирование новых объектов, что, в свою очередь, повлияет на повышение экономики страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. H. Khattak, R. Greenough, N. Brown. Suitability of exergy analysis for industrial energy efficiency, manufacturing and energy management. / ECEEE 2012 Summer study of energy efficiency in industry, pp. 237-245, 2012
2. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л. Л., Капустенко П. А. Ульев Л. М. Основы интеграции тепловых процессов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2000
3. X. Feng, X. X. Zhu. Combining pinch and exergy analysis for process modifications. / Applied Thermal Engineering, vol. 17, No. 3, pp 249-261, UK, 1997
4. Яковлева О. Ю. Моделирование и системный анализ эффективности теплообмена в производстве карбамида. – Дисс. на соиск. уч. ст. канд. т. н., Одесса, 2012
5. Invensys SimSci-Esscor. PRO/II. http://iom.invensys.com/EN/Pages/SimSci-Esscor_ProcessEngSuite_PROII.aspx May 2011
6. Aspen Technology, Inc. HYSYS. <http://www.aspentech.com/hysys/> May 2011
7. GIBBS моделирование в нефтегазовой отрасли. GIBBS. <http://www.gibbsim.ru/node/> May 2011
8. Kotas T. J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. / Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1993
9. C. Koroneos. A solar power system in the city of Thessalonica with the use of the Pinch method for entropy minimization. / Int. J. Exergy, Vol 4., No 2, 2007
10. Kazuo Matsuda, Yasuki Kansha, Chihiro Fushimi, Atsushi Tsutsumi, Akira Kishimoto. Advanced Energy Saving and its Applications in Industry. / Springer-Briefs in Applied Science and Technology, 2013
11. L. Wang, Y. Yang, T. Morosuk, G. Tsatsaronis. Advanced Thermodynamic Analysis and Evaluation of

a Supercritical Power Plant. / Open Access Energies 2012, 5, 1850-1863

12. Elin Svensson, Simon Harvey. Pinch Analysis of a Partly Integrated Pulp and Paper Mill. / World Renewable Energy Congress 2011, Sweden, 1521-1528
13. Y. Demirel. Thermodynamic Analysis Of Separation Systems. / Separation Science and Technology, Vol. 39, No. 16, pp. 3897-3942, 2004
14. Mei Gong. Using Exergy and Optimisation Models to Improve Industrial Energy Systems towards Sustainability. / Linkoping Studies in Science and Technology, Dissertation No. 868, Sweden, Linkoping, 2004
15. Roger Nordman. New process integration methods for heat-saving retrofit projects in industrial systems. / Thesis for the degree of doctor of philosophy, Sweden, Goteborg, 2005
16. Amir vosough and Sadeghvosough. Study of Thermal Optimization in Power Plant. / International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, Vol. 2, No. 7, October, 2011, pp. 48-54
17. Masoud Taghavi, Mohsen Abdollahi, Gholamreza Salehi. Thermodynamic and Thermo Economic Optimization of Combined Cycle Power Plant. / International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol. 1, No. 2, May 2013, pp. 186-190
18. Russel C. McKenna. Industrial energy efficiency. Indisciplinary perspectives on the thermodynamic, technical and economic constraints. / A thesis for the degree of Doctor of Philosophy, University of Bath, Department of Mechanical Engineering, March 2009
19. Truls Gundersen. An Introduction to the Concept of Exergy and Energy Quality. / Department of Energy and Process Engineering Norwegian University of Science and Technology, Version 4, Trondheim, Norway, March, 2011
20. M. K. Pal, Anil Kumar, H. Chandra. Energy and Exergy Analysis Of Boiler and Turbine Of Coal Fired Thermal Power Plant. / International Journal of Engineering and Technology, Vol. 2, Issue 6, June 2013, pp. 1428-1439

REFERENCES

1. S. H. Khattak, R. Greenough, N. Brown. Suitability of exergy analysis for industrial energy efficiency, manufacturing and energy management. / ECEEE 2012 Summer study of energy efficiency in industry, pp. 237-245, 2012
2. Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyanskiy L. L., Kapustenko P. A., Ulyev L. M. Osnovy integratsii teplovyh protsessov. – Kharkov: NTU «HPI», 2000
3. X. Feng, X. X. Zhu. Combining pinch and exergy analysis for process modifications. / Applied Thermal Engineering, vol. 17, No. 3, pp 249-261, UK, 1997
4. Yakovleva O. Yu. Modelirovanie I sistemnyi analiz effektivnosti teploobmena v proizvodstve karbamida. – Diss. na soisk. uch. st. kand. tehn. nauk., Odessa, 2012
5. Invensys SimSci-Esscor. PRO/II. http://iom.invensys.com/EN/Pages/SimSci-Esscor_ProcessEngSuite_PROII.aspx May 2011

6. Aspen Technology, Inc. HYSYS. <http://www.aspentech.com/hysys/> May 2011
7. GIBBS modelirovanie v neftegazovoy otrasli. GIBBS. <http://www.gibbsim.ru/node/> May 2011
8. Kotas T. J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. / Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1993
9. C. Koroneos. A solar power system in the city of Thessalonica with the use of the Pinch method for entropy minimization. / *Int. J. Exergy*, Vol 4., No 2, 2007
10. Kazuo Matsuda, Yasuki Kansha, Chihiro Fushimi, Atsushi Tsutsumi, Akira Kishimoto. Advanced Energy Saving and its Applications in Industry. / Springer-Briefs in Applied Science and Technology, 2013
11. L. Wang, Y. Yang, T. Morosuk, G. Tsatsaronis. Advanced Thermodynamic Analysis and Evaluation of a Supercritical Power Plant. / *Open Access Energies* 2012, 5, 1850-1863
12. Elin Svensson, Simon Harvey. Pinch Analysis of a Partly Integrated Pulp and Paper Mill. / *World Renewable Energy Congress 2011*, Sweden, 1521-1528
13. Y. Demirel. Thermodynamic Analysis Of Separation Systems. / *Separation Science and Technology*, Vol. 39, No. 16, pp. 3897-3942, 2004
14. Mei Gong. Using Exergy and Optimisation Models to Improve Industrial Energy Systems towards Sustainability. / *Linkoping Studies in Science and Technology*, Dissertation No. 868, Sweden, Linkoping, 2004
15. Roger Nordman. New process integration methods for heat-saving retrofit projects in industrial systems. / Thesis for the degree of doctor of philosophy, Sweden, Goteborg, 2005
16. Amir vosough and Sadeghvosough. Study of Thermal Optimization in Power Plant. / *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, Vol. 2, No. 7, October, 2011, pp. 48-54
17. Masoud Taghavi, Mohsen Abdollahi, Gholamreza Salehi. Thermodynamic and Thermo Economic Optimization of Combined Cycle Power Plant. / *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, Vol. 1, No. 2, May 2013, pp. 186-190
18. Russel C. McKenna. Industrial energy efficiency. Indisciplinary perspectives on the thermodynamic, technical and economic constraints. / A thesis for the degree of Doctor of Philosophy, University of Bath, Department of Mechanical Engineering, March 2009
19. Truls Gundersen. An Introduction to the Concept of Exergy and Energy Quality. / Department of Energy and Process Engineering Norwegian University of Science and Technology, Version 4, Trondheim, Norway, March, 2011
20. M. K. Pal, Anil Kumar, H. Chandra. Energy and Exergy Analysis Of Boiler and Turbine Of Coal Fired Thermal Power Plant. / *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 2, Issue 6, June 2013, pp. 1428-1439.

Получена в редакції 05.11.2013, прийнята к печати 03.12.2013