

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

АЛМАТЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ УНИВЕРСТЕТІ
АЛМАТИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ALMATY TECHNOLOGICAL UNIVERSITY

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТОНАЗЫТУ АКАДЕМИЯСЫ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА
INTERNATIONAL ACADEMY OF REFRIGERATION



IV ХАЛЫҚАРАЛЫҚ
ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ҚАЗАҚСТАН-ТОНАЗЫТУ 2014»

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «КАЗАХСТАН-ХОЛОД 2014»

IV INTERNATIONAL
SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE
«KAZAKHSTAN-REFRIGERATION 2014»

Конференция баяндамаларының жинағы
27 ақпан, 2014 ж.

Сборник докладов конференции
27 февраля 2014 г.

Proceedings of the Conference
February 27, 2014

Алматы, 2014

УДК 621.56/59
ББК 31.397
К14

Сборник докладов подготовлен под редакцией доктора химических наук,
академика **Кулажанова К.С.**

Редакционная коллегия:

Цой А.П., Кизатова М.Ж., Хмельнюк М.Г., Эглит А.Я.,
Шлейкин А.Г., Андреева В.И. (ответ. секретарь)

К14 Казахстан-Холод 2014: Сборник докладов международной научно-
технической конференции (27 февраля 2014 г.) – Алматы: АТУ, 2014. – 139с.

ISBN 978-601-263-274-3

В докладах представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований ученых и специалистов Казахстана, Германии, России, США, Японии и Украины по направлениям: теплохладоснабжения, кондиционирования и экологии.

Сборник рассчитан на специалистов и ученых, работающих в областях пищевой, химической, нефтеперерабатывающей промышленности, а также гостиничном бизнесе и спортивных комплексах.

УДК 621.56/59
ББК 31.397

ISBN 978-601-263-274-3

©АТУ, 2014

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ СЕТЕЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Яковлева О.Ю.¹, к.т.н., Деревянко Г.В.², к.т.н., Яковлев Ю.А.¹, к.т.н., доц.,
Хмельнюк М.Г.¹, д.т.н., проф.

¹ Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, Украина

² HARMOTECH GROUP GMBH, г. Берлин, Германия

E-mail: osarja@gmail.com

Энергетическая эффективность химико-технологических систем (ХТС) в большой мере зависит от правильности выбора основных режимных параметров установки и вида ее технологической схемы. Современный подход к решению указанных задач из-за сложности таких установок возможен только на основе современных методов математического моделирования и оптимизации.

В настоящее время на рынке программных продуктов лучшими являются программные комплексы PRO-2 [1] и HYSYS [2], предназначенные для программного построения математических моделей. Модели такого типа требуют пополнения задачи экспериментальными (модельными) данными по теплофизическим свойствам веществ, а также конструктивным и химическим характеристикам элементов системы, что затрудняет формализацию технологического моделирования.

В работах [3,4] предпринята попытка построить обобщенные представления об инженерных схемах, получившая наименование HeatExchangerNetwork (HEN) (теплообменная сеть) и MassExchangerNetwork (MEN) (массообменная сеть). Методология HEN/MEN позволяет разработать адекватную математическую модель, качественно и количественно удовлетворяющую вышеперечисленным требованиям.

Объекты исследования – производственные схемы сложных химико-технологических систем, их структура и режимные параметры.

Методы исследования – математическое моделирование теплообменных сетей ХТС, позволяющее выполнить численный эксперимент и аналитическое исследование эффективности теплообмена с использованием пакета прикладных программ.

Представлены принципы построения математических HEN-моделей химических производств.

В работе [5] на основе представления элемента межсетевое и внутрисетевое обмена энергией введено понятие энергопотенциала для элемента системы и эффективности энергетического обмена. Данные определения позволяют построить систему уравнений, связывающую температуры на выходе из элемента со значениями этих величин на входе в него.

В работе [6] приведены правила и приемы преобразования инженерной схемы ХТС в ее топологическую HEN модель. На примере часто встречающегося схемного решения сетевой модели энергообмена по аналогии с введенным в работе [3] понятием эффективности элемента межсетевое обмена, в качестве интегральной характеристики системы вводится понятие её эффективности.

В рамках предпринятых построений могут быть решены две задачи.

Первая сводится к определению мер энергии в узлах системы при заданных соотношения расхода потоков и эффективностях изменения меры энергии в элементах системы, следовательно, к проверке реализации требуемой интегральной характеристики.

Вторая сводится к определению эффективности обмена энергией в элементах системы и потоков на её ветвях, удовлетворяющих требуемой интегральной характеристике.

Показано, что при такой формализации подхода к постановке задач их решение будет удовлетворять фундаментальным принципам, таким как закон сохранения и превращения энергии и второе начало термодинамики.

На топологии системы, представленной в работе [6], построим упорядоченную сеть. Для этого дополнительный и основной узлы сети пополним условными ветвями и установим на них компенсационный элемент, предназначенный для подохлаждения потока подводимого из узла № 1 до требуемой температуры в узле № 13. Такую сеть будем называть упорядоченной.

Систему будем называть термодинамически упорядоченной или просто упорядоченной, если каким-либо эквивалентным преобразованием её сети упорядочены, другими словами сети имеют один вход. Используем обозначения, принятые в работах [5,6], где T, Θ – меры энергии на входе в систему. Максимально возможное количество энергии $\Delta\Phi$, которым могут обменяться потоки,

фактически переданной энергии к энергетическому потенциалу будем называть эффективностью энергетического обмена η_E , а отношение изменения температуры в элементе к разности температур на входе - эффективностью изменения температур ϕ .

Для общей оценки работоспособности системы введем понятие ее интегральной характеристики. Как правило, в качестве такой характеристики для систем вводят коэффициент полезного действия, представляющий собой отношение количества энергии полученного в одном или нескольких элементах промежуточных сетей к количеству энергии переданной системе в передающей сети. В рассмотренном примере в качестве КПД можно определить:

$$\eta = \frac{Q_4}{Q_1} = \frac{CP_{III} \cdot (T_{14} - T_{13})}{CP_I \cdot (T - T_2)}, \quad (1)$$

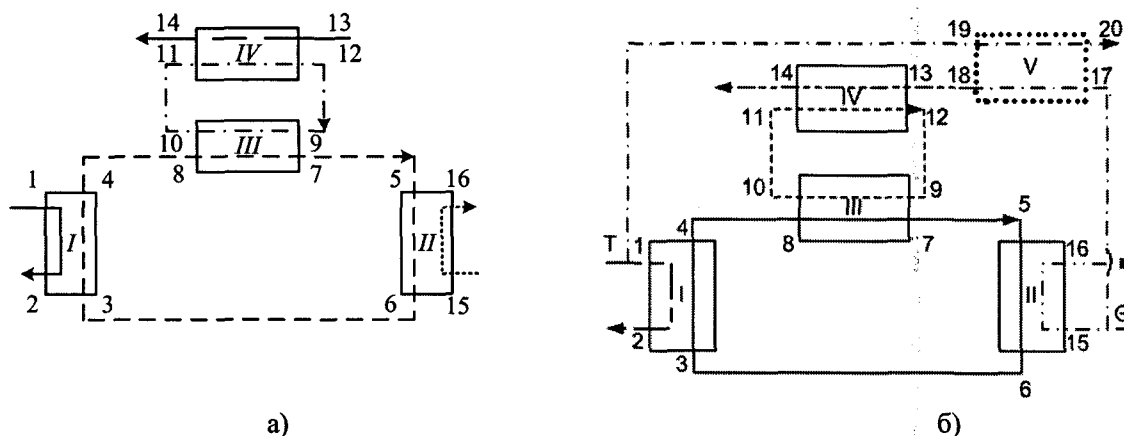


Рисунок 1 - Схема сетевой модели энергообмена:
а) – без компенсационного элемента; б) - с компенсационным элементом; I, II, III, IV – элементы межсетевое энергообмена; V – компенсационный элемент.

По аналогии с введенным понятием эффективности элемента межсетевого обмена [5], в качестве интегральной характеристики системы введем понятие ее эффективности как отношение количества энергии переданного в ней Q к приложенному энергетическому потенциалу $\Delta\Phi$ [4]:

$$\eta_E = \frac{Q}{\Delta\Phi}, \quad (2)$$

Введем ряд дополнительных определений.

1. Любое объединение сетей элементами межсетевого обмена или контурами, предназначенное для организации энергообмена, будем называть системой.
2. Узлы входа потока с наибольшим значением меры энергии будем называть опорными, узлы входа потока с наименьшим значением меры энергии будем называть основными, остальные узлы входа потока рассматриваемой сети будем называть дополнительными.
3. Сети с наибольшим и наименьшим значением меры энергии на входе потоков в систему будем называть, соответственно, передающей и принимающей, а остальные – промежуточными.
4. Основной и опорный узлы передающей и принимающей сети будем называть основным и опорным узлами системы.

Рассматривая схемное решение при использовании принятых определений, очевидно, что есть четыре элемента объединенных контурами с нумерацией узлов {3,4,8,7,5,6} и {9,10,11,12}. Предположим, что передача энергии реализуется от сети {1,2} к сетям {15,16} и {13,14}.

Определим узел 1 опорным для системы, узел 15 основным для сети {15,16}, узел 13 основным для сети {13,14}, кроме того, будем полагать, что узел 15 является основным для системы. Исходя из этого, определим сеть {1,2} как передающую, сеть {15,16} как принимающую, сеть {13,14} как промежуточную.

Приведем каждому узлу системы в соответствии с его номером значение температуры и

сети {15,16}; CP_{III} – для сети {13,14}; CP_{IV} – для контура {3,4,8,7,5,6}; CP_V – для контура {9,10,11,12}.
в сети {19,20} CP_{VI} – для сети {19,20}.

Предполагая отсутствие потерь на ветвях сетей, запишем:

$$\begin{aligned} T_3=T_6; T_4=T_8; T_5=T_7; T_{10}=T_{11}; \\ T_9=T_{12}; T_{19}=T; T_{18}=T_{13}; T_{17}=\Theta. \end{aligned} \quad (3)$$

В соответствии с принятыми выше обозначениями, определим отношение расходных теплоемкостей на элементах системы:

$$\alpha_1 = \frac{CP_I}{CP_{IV}}; \quad \alpha_2 = \frac{CP_{IV}}{CP_{II}}; \quad \alpha_3 = \frac{CP_{IV}}{CP_V}; \quad \alpha_4 = \frac{CP_V}{CP_{III}}; \quad \alpha_5 = \frac{CP_{VI}}{CP_{III}} \quad (4)$$

Учитывая введенное определение эффективности изменения температур (мер энергии) для каждого элемента схемы $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5$, запишем систему уравнений баланса энергий и изменения эффективностей мер энергии:

$$\begin{cases} \alpha_1 \cdot (T - T_2) = T_4 - T_3 \\ \alpha_3 \cdot (T_3 - T_5) = T_{10} - T_9 \\ \alpha_2 \cdot (T_5 - T_3) = T_{16} - \Theta \\ \alpha_4 \cdot (T_{10} - T_9) = T_{14} - T_{13} \\ \alpha_5 \cdot (T - T_{20}) = T_{13} - \Theta \end{cases} \begin{cases} T - T_2 = \phi_1 \cdot (T - T_3) \\ T_4 - T_5 = \phi_3 \cdot (T_4 - T_9) \\ T_5 - T_3 = \phi_2 \cdot (T_5 - \Theta) \\ T_{10} - T_9 = \phi_4 \cdot (T_{10} - T_{13}) \\ T - T_{20} = \phi_5 \cdot (T - \Theta) \end{cases} \quad (5)$$

Система уравнений баланса энергий и изменения эффективностей мер энергии в матричном виде запишется:

$$\begin{pmatrix} -\alpha_1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 & -\alpha_3 & 0 \\ 0 & -\alpha_2 & 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_{20} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -\alpha_4 & \alpha_4 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_9 \\ T_{10} \\ T_{14} \\ T_{16} \\ T_{13} \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} -\alpha_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\alpha_5 \end{pmatrix} + \Theta \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} -1 & \phi_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\phi_3 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1-\phi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_{20} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \phi_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1-\phi_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_9 \\ T_{10} \\ T_{14} \\ T_{16} \\ T_{13} \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} -(1-\phi_1) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -(1-\phi_5) \end{pmatrix} + \Theta \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\phi_2 \\ 0 \\ -\phi_5 \end{pmatrix}$$

Выделим систему уравнений для компенсационного элемента:

$$T - T_{20} = \phi_5 \cdot (T - \Theta); \quad \alpha_5 \cdot (T - T_{20}) = T_{13} - \Theta. \quad (7)$$

Получим:

$$T_{13} = T - (T - \Theta) \cdot (1 - \alpha_5 \cdot \phi_5); \quad T_{20} = T - \phi_5 \cdot (T - \Theta). \quad (8)$$

С учётом этого система уравнений для неупорядоченной системы примет вид:

$$\begin{pmatrix} -\alpha_1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 & -\alpha_3 \\ 0 & -\alpha_2 & 0 & \alpha_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ -\alpha_4 & \alpha_4 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_9 \\ T_{10} \\ T_{14} \\ T_{16} \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} -\alpha_1 \\ 0 \\ 0 \\ -\alpha_5 \cdot \phi_5 \end{pmatrix} + \Theta \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ -(1-\alpha_5 \cdot \phi_5) \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} -1 & \phi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\phi_3 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1-\phi_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \phi_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1-\phi_4 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_9 \\ T_{10} \\ T_{14} \\ T_{16} \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} -(1-\phi_1) \\ 0 \\ 0 \\ -\phi_4 \cdot \phi_5 \cdot \alpha_5 \end{pmatrix} + \Theta \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\phi_2 \\ -(1-\alpha_5 \cdot \phi_5) \end{pmatrix}$$

Отметим, что предложенная процедура упорядочения системы пополняет задачу об определении мер энергии в ее узлах задачей построения модельных представлений об обмене энергией в компенсационном элементе, что сводит топологию системы к двум взаимодействующим сетям. Поскольку количество переданной и принятой энергии в таких сетях равны, то это приводит к единственному энергопотенциалу, реализующему инженерную задачу, предполагая существование меры энергии, характеризующей количество принятой и переданной энергии на выходе из этих сетей.

Представлены принципы построения математических HEN-моделей химических производств.

Построенная концепция позволяет воспринимать информацию в виде алгоритмов, приемлемых для разработки программного обеспечения, с целью автоматизировать схему построения системы уравнений, а также построить программную среду, генерирующую модель системы по её топологическому представлению.

Для проверки на адекватность было выполнено моделирование полной технологической схемы действующего предприятия по производству карбамида и проведен численный эксперимент с использованием программного комплекса, разработанного компанией NETWORK SOLUTION DEVELOPMENT CO. INC .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Invensys SimSci-Esscor. PRO/II. http://iom.invensys.com/EN/Pages/SimSci-Esscor_ProcessEngSuite_PROII.aspx May 2011.
2. Aspen Technology, Inc. HYSYS. <http://www.aspentech.com/hysys/> May 2011.
3. Yee, T. F., Grossmann I. E. and Kravanja, Z., Simultaneous Optimization Models for Heat Integration – I. Area and Energy Targeting and Modeling of Multi – Stream Exchangers, *Comp. and Chem. Eng.*, 14(10):1151 – 1164, 1990.
4. Yee, T. F. and Grossmann, I. E., Simultaneous Optimization Models for Heat Integration – II. Heat Exchanger Network Synthesis, *Comp. and Chem. Eng.*, 14(10):1165 – 1184, 1990.
5. Яковлев А.Ю., Хмельнюк М.Г., Яковлева О.Ю. Оценка эффективности межсетевых энергообменов // *Холодильная техника і технологія*. – 2008. - № 6. (116). – С. 25-27.
6. Яковлев А.Ю., Хмельнюк М.Г., Яковлева О.Ю. Сетевой анализ энергообмена в сложных системах. Тематичний збірник наукових праць «Обладнання та технології харчових виробництв», Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі. -М. Туган-Барановського. – 2009. – Вип.21.-С.322-328.