

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

Яковлева О. Ю., Яковлев Ю. А., Туманский В. И.

1. Введение

Эффективное использования материальных и энергетических ресурсов на промышленных предприятиях становится все более актуальным для Украины, поскольку энергоёмкость украинского промышленного производства и сферы социальных услуг оказывается в 2–3 раза выше общемировых показателей. В структуре энергопотребления отраслями промышленности Украины на долю металлургии, химической, нефтехимической и газовой промышленности суммарно приходится более 60 %. Технологические схемы действующих предприятий создавались во времена относительной дешевизны энергоносителей. В настоящее время большинство из них требует существенной модернизации с целью повышения эффективности использования энергоресурсов. Любая модернизация производства немыслима без предварительного анализа его энергоэффективности.

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. Моделирование ХТС предполагает применение системного подхода для исследования полной технологической схемы всего процесса получения продукции и комплексную оптимизацию энергоресурсосберегающих и экологически безопасных технологий. За последние 20 лет разработаны идеология и пакеты прикладных программ, позволяющие решать задачи как улучшения качества технологии, так и существенного повышения энергоэффективности производства. Поэтому совершенствование методов моделирования и анализа эффективности тепломассообмена в промышленности является актуальной задачей.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом данного исследования является химико-технологическая система и протекающие в ней процессы тепломассообмена. В инженерной практике системы представляются технологическими схемами. Схемы любого современного производства представляют собой конечное множество аппаратов, объединенных сетями трубопроводов. Графическое изображение представляет собой сеть линий, соединяющих аппараты. Такая стилизация технологических схем позволяет получить общее представление об объединении оборудования в производственную систему.

Отсутствие стандартизации при графическом представлении инженерных схем не позволяет создать обобщённую логику считывания графической ин-

формации с последующей её обработкой программным комплексом. Возникает необходимость в отработке правил, позволяющих поставить в соответствие инженерной схеме её топологическое представление в виде сетей, объединяемых элементами для определения процессов теплообмена в системе.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования заключается в разработке принципов моделирования и системного анализа эффективности теплообмена и создании инженерных методик построения математических описаний сложных ХТС.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Выработать правила для преобразования ХТС в её топологическое представление.
2. Выбрать критерии эффективности процессов теплообмена; разработать модели массообменных и теплообменных сетей ХТС.
3. Разработать объединенные топологическую и математическую модели теплообменной сети ХТС.
4. Проверить на адекватность разработанные представления HEN/MEN моделирования.

4. Исследование существующих решений проблемы

В 90-е годы прошлого века была предпринята попытка построить обобщенные представления об инженерных схемах, получившая наименование Heat Exchanger Network (HEN) (теплообменная сеть) и Mass Exchanger Network (MEN) (массообменная сеть) [1–4].

Такой подход позволяет не только представить схему, но и создать язык для пакетов прикладных программ, позволяющий программно по графическому изображению создавать модели системы [5–9].

Сегодня ведущие проектные и научно-исследовательские институты, инжиниринговые фирмы и производственные предприятия широко применяют компьютерные системы технологического моделирования. Эти системы (пакеты прикладных программ) позволяют как «собирать» технологические схемы, так и выполнять многовариантные расчеты, решать задачи оптимизации и т. д.

4.1. Анализ систем технологического моделирования

В настоящее время лучшими в мире системами технологического моделирования считаются PRO-2 [5] и HYSYS [6]. Из других аналогов заслуживают внимания GIBBS [7] (разработка специалистов, объединенных в ООО «Топэнергобизнес», г. Москва, Россия) и ГазКондНефть (разработка коллектива специалистов Института газа Национальной академии наук, г. Киев, Украина) [8]. Существует и ряд других более простых и менее универсальных систем моделирования, которые в настоящее время практически не используются. В [9] приведены возможности современных пакетов моделирующих программ.

PRO-2 [5]. Эта система создана американской фирмой «Invensys SimSci-Esscor». Система PRO-2 считается наиболее мощной и развитой в мире. Достоинства PRO-2:

– в систему включены все виды оборудования и все известные в мире методики расчетов;

– она позволяет добавлять собственные алгоритмы, на встроенном языке «Фортран»;

– разработка WINDOWS-версии и интерфейсной оболочки PROVISION существенно облегчила работу с системой.

К недостаткам системы относятся:

– ее сложность и то, что в качестве пользователя необходим высококвалифицированный специалист;

– невозможность русификации экрана; использование встроенного языка FORTRAN, что осложняет работу по развитию системы в среде WINDOWS.

HYSYS [6]. Эта система создана американской компанией «Aspen Technology, Inc.» и является WINDOWS-версией, которая в настоящее время заменяет весьма популярную в мире DOS-версию HYSIM [10]. Главным достоинством системы HYSYS является то, что WINDOWS-версия переработана на языке C++. Она является полностью интегрированной и позволяет моделировать сложные схемы с сетями трубопроводов, установками подготовки и переработки и т. п. Система HYSYS предоставляет возможность моделирования вложенной иерархической структуры схем, что важно для увязки функционирования отдельных производств в масштабе завода. Очень удобно организован интерфейс пользователя, пожалуй, наиболее удобно из всех проанализированных систем – вся среда построена на электронных таблицах, которые легко обмениваются данными через буфер обмена с приложениями WINDOWS (например, с EXCEL). Еще одним достоинством является то, что в этой системе наилучший алгоритм расчета ректификационных колонн – он очень быстро решается и весьма устойчив. С учетом перспектив и темпов развития систему технологического моделирования HYSYS в настоящее время следует признать лучшей в мире.

На практике технологическое моделирование может применяться, прежде всего, при проектировании обустройства новых месторождений и проектировании новых технологических установок. Весьма эффективно применение технологического моделирования при разработке решений по реконструкции и модернизации технологии. Но математические модели лучших программных комплексов PRO-2 и HYSYS требуют значительного экспертного пополнения задачи инженерными проработками конструкций элементов системы.

4.2. Интеграция энергии внутри производственного цикла как энергосберегающий ресурс при системном подходе

Любой химико-технологической схеме может быть поставлено в соответствие топологическое представление, стилизующее систему под HEN-MEN [11–16]. При такой замене реальных объектов и связей важнейшим является соблюдение соответствия, определяющего адекватность графической модели реальной системе.

Одной из задач, стоящей перед программными комплексами при анализе систем, является качественное улучшение использования энергоресурса, заложенного

в систему (интеграция энергии). Постановка такой задачи приводит к синтезу (видоизменению структуры) системы [11–16]. Изменение структуры системы приводит к пополнению сетями теплообменных аппаратов. Одним из методов решения задачи синтеза является применение пинч-анализа [17–19]. Пинч-анализ позволяет интегрировать тепловые потоки внутри производственного цикла.

Совместно с применением пакетов прикладных программ, путем изменения структуры системы, можно найти способы уменьшения энергопотребления, достигающие 30–50 % [19].

В [20] выполнено компьютерное моделирование базовой технологической схемы производства биоэтанола из лигноцеллюлозы с использованием программного комплекса Aspen Plus, выпущенный американской фирмой Aspen Tech Inc. Данное программное обеспечение проанализировало варианты интеграции тепловых процессов внутри производственного цикла и выполнило синтез энергосберегающих технологических схем производства биоэтанола.

Сравнения данных, полученных в результате моделирования и производственных базовой схемы показало:

- производство биоэтанола из 1 тонны сухой древесины увеличилось на 23,8 %;
- удельные затраты энергии на производство 1 литра биоэтанола уменьшились на 25 %.

Пинч-анализ, как способ объединения энергетических уровней, позволяет достичь определенных успехов в интеграции тепла на производствах. Однако, эвристичность предложенных правил Линхоффом и Смиттом не позволяет однозначно ответить на вопрос: «Является ли этот способ объединения энергетических уровней наилучшим?». Их число может достигать огромных значений, а пинч-анализ не дает четкого критерия выбора лучшего способа объединения.

5. Методы исследований

Современное химическое производство представляет собой ХТС, состоящую из большого количества аппаратов и технологических связей между ними. При всей сложности ХТС существуют типовые соединения аппаратов между собой, объединяющих их в единую схему. К ним относятся: последовательное соединение, параллельное, последовательно-обводное (байпасное), рециркуляционное и контурное соединения [21].

Конечность способов объединения аппаратов в ХТС позволяет привлечь к их описанию топологические представления и, как следствие, математический аппарат теории графов [21]. В этой связи представляется целесообразным ввести ряд определений, используемых в дальнейшем:

1. Линию, соединяющую две точки, будем называть ветвью.
2. Любую точку, объединяющую, по крайней мере, две ветви будем называть узлом.
3. Любое объединение ветвей, по которым движется поток, имеющее входы и выходы для потока, будем называть сетью.
4. Любое объединение ветвей, по которым движется поток, имеющее только один вход для потока, будем называть упорядоченной сетью.

5. Узел, объединяющий, по крайней мере, три ветви одной и той же сети будем называть узлом смешения или элементом внутри сетевого обмена энергией. При этом меры энергии, движущихся по ветвям потоков, должны быть различны по величине.

6. Объединение не более двух ветвей различных сетей, предназначенное для организации обмена энергией между ними, будем называть элементом межсетевого обмена энергией.

7. Сеть без входа и выхода для потока, предназначенную для организации передачи энергии через элементы межсетевого обмена другим сетям, будем называть контуром.

Введенная система определений позволяет описать структуру химико-технологической системы, понимая под аппаратами «чёрные ящики», объединяемые описанными способами. В реальности сами аппараты представляют собой достаточно сложные технологические системы и их также можно рассматривать как ХТС [21].

Одним из ключевых формальных тезисов, используемых в этой работе, является предположение о возможности представления совокупного взаимодействия потоков в элементах системы совокупностью парных взаимодействий. Это предположение основано на возможности представления функции нескольких переменных суперпозицией функций двух переменных [21]. Предлагаемая схема построения представляет собой нечто среднее между общепринятым построением топологии системы так называемым «схемным решением» и описанием процессов в элементах системы. При введенном представлении систем сохраняется ряд требований.

Логика инженерных представлений о топологии системы. Трубопроводы, представляющие собой систему объединяющую аппараты, представляются связями. Сами аппараты представляются объектами, в которых происходит парное взаимодействие потоков.

Особенности представления о процессах (физические представления). В работе это обстоятельство учитывается путем ввода понятий эффективности массообмена и теплообмена в элементах системы.

При этом необходимо учитывать, что сами построения в принятой логике должны проводиться в соответствии со «схемным решением» и с требованиями эксперта. Роль эксперта заключается не только в проверке соответствия между схемным решением и топологическим представлением о системе. Необходимо также определить направления массовых и энергетических потоков и условия однозначности (режим параметров на входе и выходе).

Это предположение позволяет представить реальный аппарат ХТС, имеющий несколько входов и выходов для потоков, совокупностью нескольких элементов, объединённых в подсистему. Для обеспечения принципа парности взаимодействия каждый из элементов имеет два входа и два выхода (рис. 1).

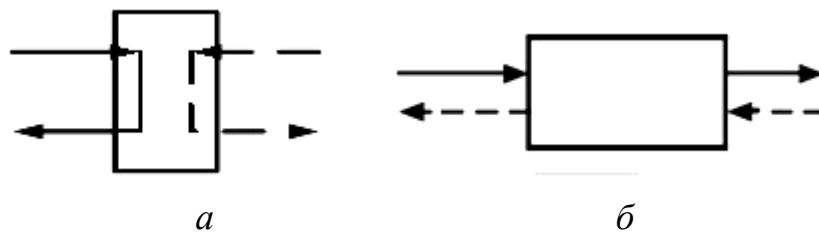


Рис. 1. Элемент межсетевого: *a* – энергообмена; *б* – массообмена

В качестве примера, рассмотрим технологическую схему азотного ожижителя (рис. 2). Используя разработанные правила и определения, преобразуем технологическую схему азотного ожижителя в ее топологическую модель, представленную на рис. 3.

Все элементы инженерной схемы (рис. 2) представлены на топологической модели (рис. 3) прямоугольниками с входными и выходными потоками. Пунктиром показаны условные потоки. Это потоки с нулевым расходом, которые сохраняют принцип парности взаимодействия в каждом элементе.

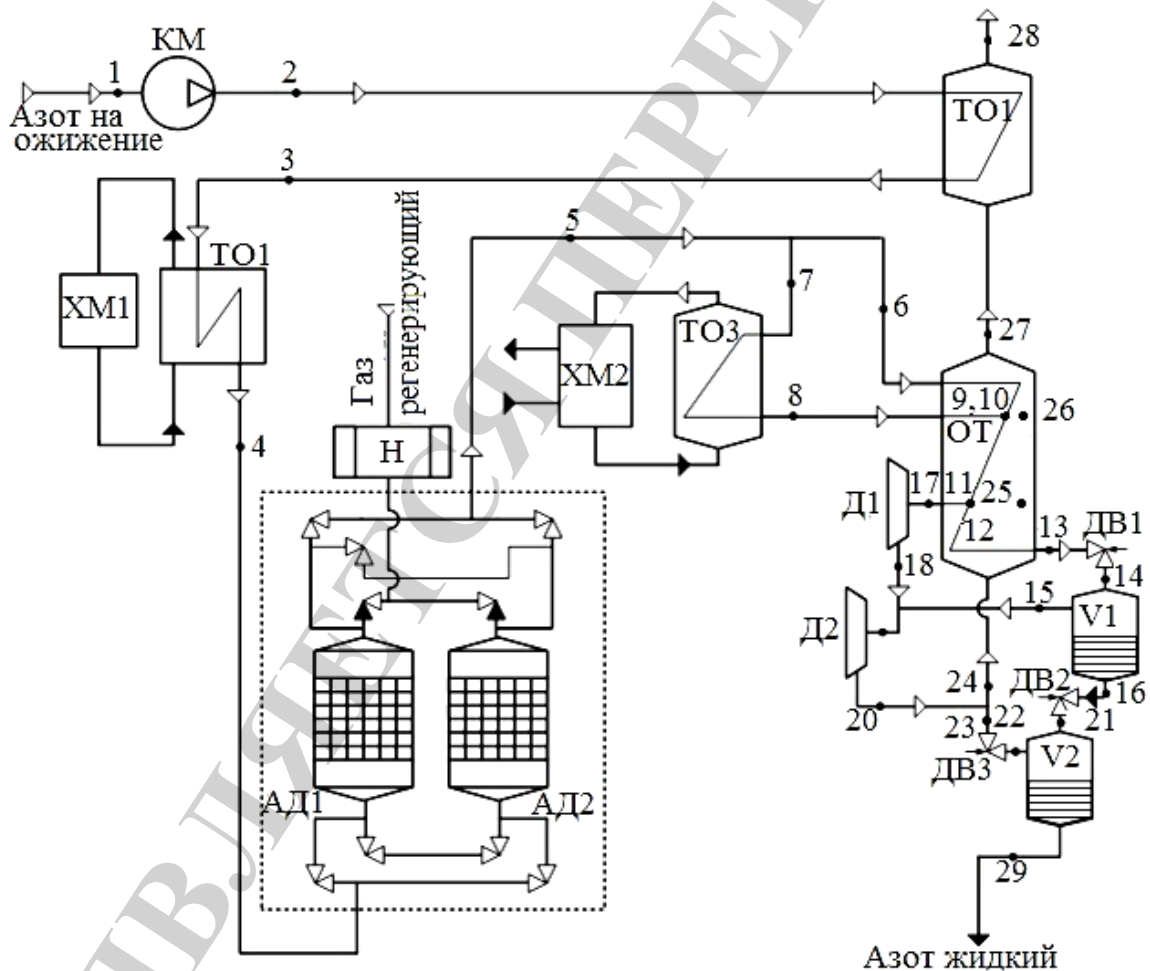


Рис. 2. Технологическая схема азотного ожижителя: КМ – компрессор; ТО1, ТО2, ТО3 – теплообменники; ХМ1, ХМ2 – холодильные машины; Д1, Д2 – турбодетандеры; ДВ1, ДВ2, ДВ3 – дроссельные вентили; V1, V2 – сборники жидкости; Ад1, Ад2 – адсорберы; Н – нагреватель; ОТ – основной теплообменник

Топологическая модель по сравнению с технологической схемой дополнена дополнительными элементами, которые называем условными. Основной теплообменник представлен тремя элементами схемы ОТ, УЭ2 и УЭ3. Это обеспечивает принцип парности взаимодействия, так как в ОТ существует три выхода и три входа. В УЭ1 вышедший из адсорбера поток азота делится на два потока: одна часть направляется на охлаждение в ОТ, а другая часть – в ТО3. В УЭ4 смешивается основной поток ОТ и поток из ТО3. В УЭ5 основной поток разделяется на две части. Детандерный поток поступает на расширение в Д1, а оставшаяся часть основного потока на охлаждение в УЭ3.

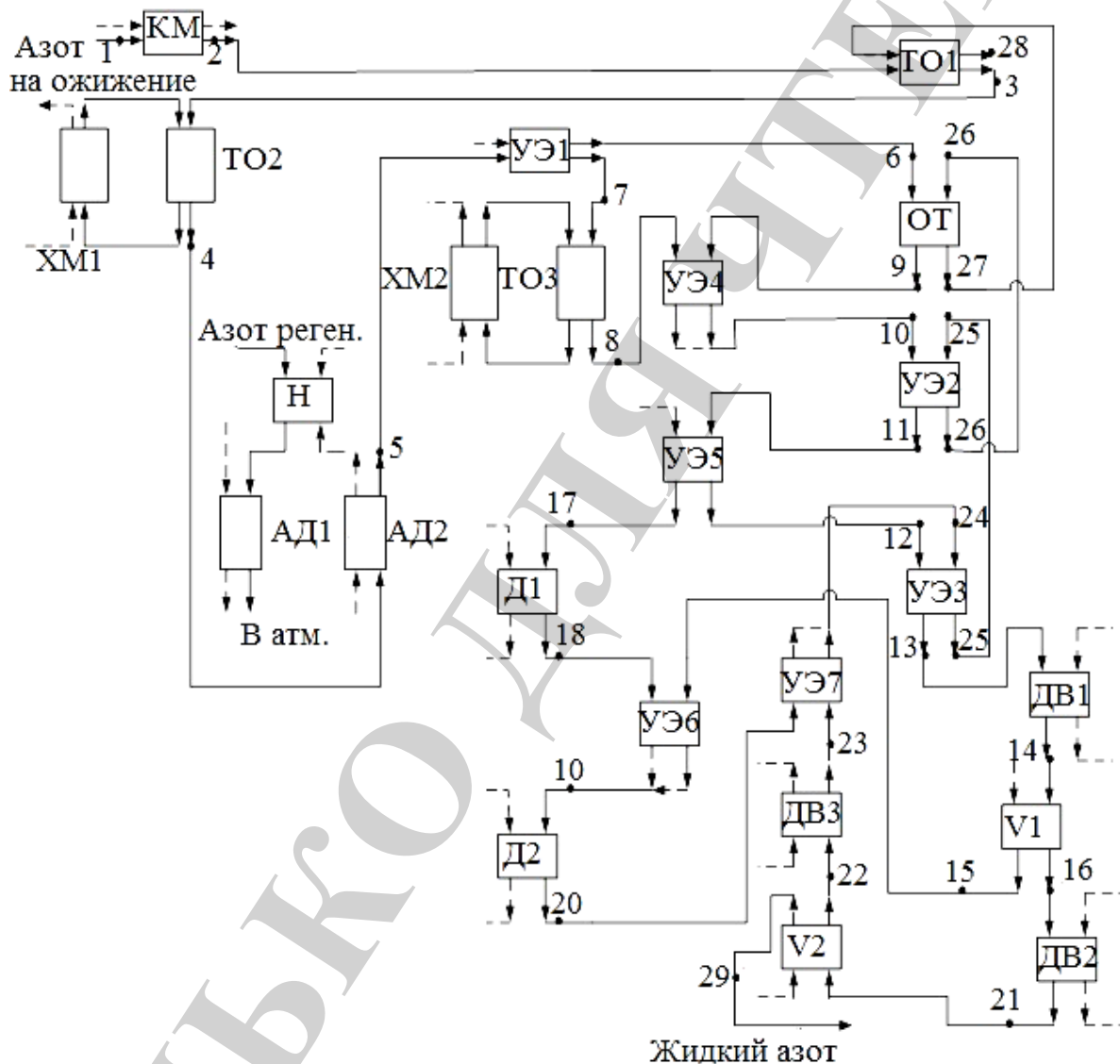


Рис. 3. Топологическая модель технологической схемы азотного ожижителя:

- КМ – компрессор; ТО1, ТО2, ТО3 – теплообменники;
- XM1, XM2 – холодильные машины; Д1, Д2 – турбодетандеры;
- ДВ1, ДВ2, ДВ3 – дроссельные вентили; V1, V2 – сборники жидкости;
- Ад1, Ад2 – адсорберы; Н – нагреватель; ОТ – основной теплообменник;
- УЭ1, УЭ2, УЭ3, УЭ4, УЭ5, УЭ6, УЭ7 – условные элементы;
- > – технологический поток; ----> – условный поток

В УЭ6 смешиваются насыщенные пары азота из сборника V1 и поток после расширения в Д1, и поступают в Д2. В УЭ7 поток азота после расширения в Д2 смешивается с насыщенным паром после дросселирования в ДВ3 и поступает на охлаждение прямого потока в основной теплообменник. Элементы УЭ4, УЭ6 и УЭ7 – узлы смешения потоков, а УЭ1 и УЭ5 – узлы разделения потоков.

Топологическая модель технологической схемы (рис. 3) позволяет разработать язык ее описания, приемлемый для создания программных комплексов, способных строить математические модели систем.

В [22] для представленного на рис. 1, б топологического представления элемента межсетевого массообмена системы записана его математическая модель, разработаны принципы построения MEN-моделей ХТС и введено понятие расходной концентрации и эффективности массообмена в элементах системы.

Предложенный метод моделирования позволяет задачу для химически реагирующих сред представить как задачу о массообмене. В рамках принятых ранее определений полную технологическую схему производства химической продукции, можно представить в виде топологической модели, для которой запишем систему уравнений баланса концентраций, используя введенные понятия расходной концентрации и эффективности массообмена. Данная математическая модель позволяет:

- построить программную среду, генерирующую модель системы по её топологическому представлению;
- проанализировать различные варианты реализации технологической схемы процесса получения готовых продуктов;
- синтезировать оптимальный, энергоресурсосберегающий вариант производственного процесса.

Для разработки HEN-модели химических производств в [23] рассмотрен элемент межсетевого теплообмена (рис. 4), в котором происходит парное взаимодействие потоков.

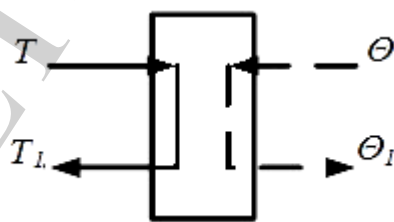


Рис. 4. Элемент межсетевого теплообмена

Отождествив поток энергии с понятием полной энтальпии, несложно записать баланс энергии для элемента в виде:

$$H - H_1 = I_1 - I \Rightarrow CP_{cp} \cdot (T_1 - T) = CP_{нагр} \cdot (\Theta - \Theta_1), \quad (1)$$

где H – полная энтальпия для потока с большим значением меры энергии; I – полная энтальпия для потока с меньшим её значением.

Обозначим T , Θ как меры энергии, а $CP_{гр}$, $CP_{нагр}$ – как расходные теплоемкости соответственно греющего и нагреваемого потоков.

Индексом «один» определены значения полной энтальпии и температур на выходе из элемента, величины без индексов относятся к входу потока.

Рассмотрим QT-диаграмму элемента теплообменной сети (рис. 5).

Если на входе в элемент заданы меры и расходные теплоемкости потоков, то можно определить среднеэнтальпийную температуру T_{Σ} для элемента:

$$T_{\Sigma} = \Theta_{\Sigma} = \frac{T \cdot CP_{гр} + \Theta \cdot CP_{нагр}}{CP_{гр} + CP_{нагр}}. \quad (2)$$

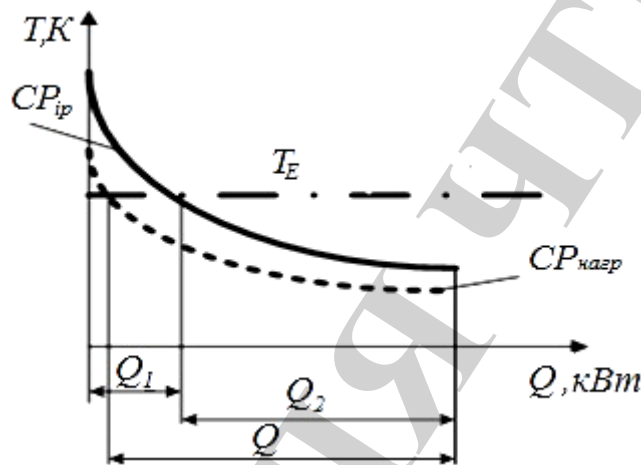


Рис. 5. QT-диаграмма элемента теплообменной сети

Количество энергии, которое поток отдает с большим энергетическим потенциалом, до достижения температурного термодинамического равновесия определится:

$$Q_1 = T \cdot CP_{гр} - \frac{T \cdot CP_{гр} + \Theta \cdot CP_{нагр}}{CP_{гр} + CP_{нагр}} \cdot CP_{гр}. \quad (3)$$

Количество энергии, которое принимает поток с меньшим энергетическим потенциалом до достижения температурного термодинамического равновесия определится:

$$Q_2 = \frac{T \cdot CP_{гр} + \Theta \cdot CP_{нагр}}{CP_{гр} + CP_{нагр}} \cdot CP_{нагр} - \Theta \cdot CP_{нагр}. \quad (4)$$

Максимально возможное количество энергии, которым могут обменяться потоки:

$$\Delta\Phi = Q_1 + Q_2 = 2 \cdot CP_{cp} \cdot CP_{нагр} \cdot \frac{T - \Theta}{CP_{cp} + CP_{нагр}} = 2 \cdot CP_{cp} \cdot \frac{1}{1 + \alpha} (T - \Theta), \quad (5)$$

где $\alpha = \frac{CP_{cp}}{CP_{нагр}}$.

Величину $\Delta\Phi$ примем в качестве предельного энергопотенциала для элемента системы. Определим отношение фактически переданного количества энергии Q к энергетическому потенциалу:

$$\eta_E = \frac{Q}{\Delta\Phi} = \frac{CP_{cp} + CP_{нагр}}{2 \cdot CP_{нагр}} \cdot \frac{T - T_1}{T - \Theta} = \frac{1 + \alpha}{2} \cdot \frac{T - T_1}{T - \Theta} = \frac{1 + \alpha}{2} \cdot \phi, \quad (6)$$

где $\phi = \frac{T - T_1}{T - \Theta}$.

Величину отношения 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 .

Введенные определения позволяют сформулировать систему уравнений, связывающую температуры на выходе из элемента со значением этих величин на входе в него:

$$T - T_1 = CP_{cp} \cdot \frac{2}{1 + \alpha} \cdot \eta_E \cdot (T - \Theta) = \phi \cdot (T - \Theta), \quad (7)$$

$$\alpha \cdot (T - T_1) = \Theta_1 - \Theta. \quad (8)$$

При этом количество энергии, которым обменялись сети, определится:

$$Q = CP_{cp} \cdot (T - T_1) = CP_{cp} \cdot \frac{2}{1 + \alpha} \cdot \eta_E \cdot (T - \Theta) = CP_{cp} \cdot \phi \cdot (T - \Theta). \quad (9)$$

В рамках принятых определений любую технологическую схему можно представить в виде сетевой модели, для которой запишем систему уравнений с учетом изменения эффективности меры энергии и решим две задачи:

- 1) определить меры энергии в узлах системы;
- 2) определить эффективность обмена энергией в узлах системы.

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

6. Результаты исследований

В [24] была выполнена проверка на адекватность разработанных представлений HEN/MEN моделирования. Технологическая схема блока синтеза производства карбамида (рис. 6), реализованная на одном из действующих предприятий, была преобразована в обобщенную топологическую HEN/MEN-модель.

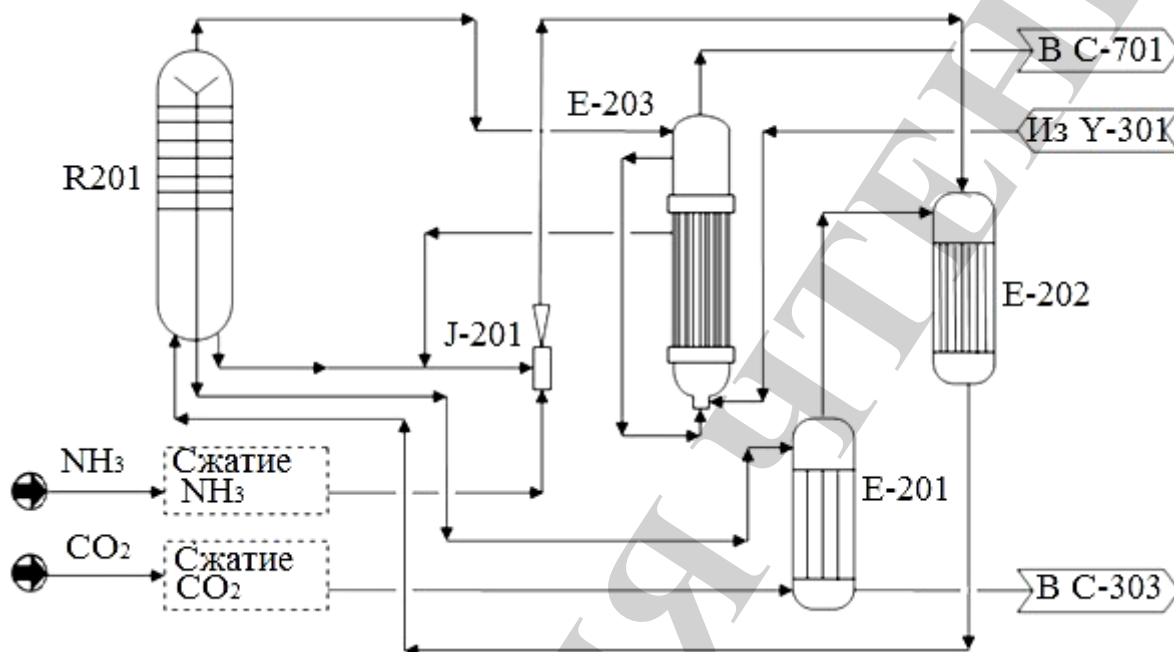


Рис. 6. Технологическая схема блока синтеза производства карбамида:

R-201 – колонна синтеза высокого давления; E-201 – стриппер;
E-202 – конденсатор высокого давления; E-203 – скруббер; J-201 – инжектор;
C-303 – ректификационная колонна низкого давления; C-701 – абсорбер;
V-301 – сборник углеаммонийных солей

Процедура компьютерного моделирования производства блока синтеза осуществлялась в несколько этапов.

На первом этапе рассматривалась технологическая схема блока синтеза производства карбамида.

На втором этапе, используя принципы построения топологических моделей массообменных сетей технологических схем, сформулированные в [21], инженерная схема преобразовывалась в ее топологическое MEN-представление. Другими словами, блоку синтеза производства карбамида был поставлен в соответствие его топологический эквивалент, приведенный на рис. 7.

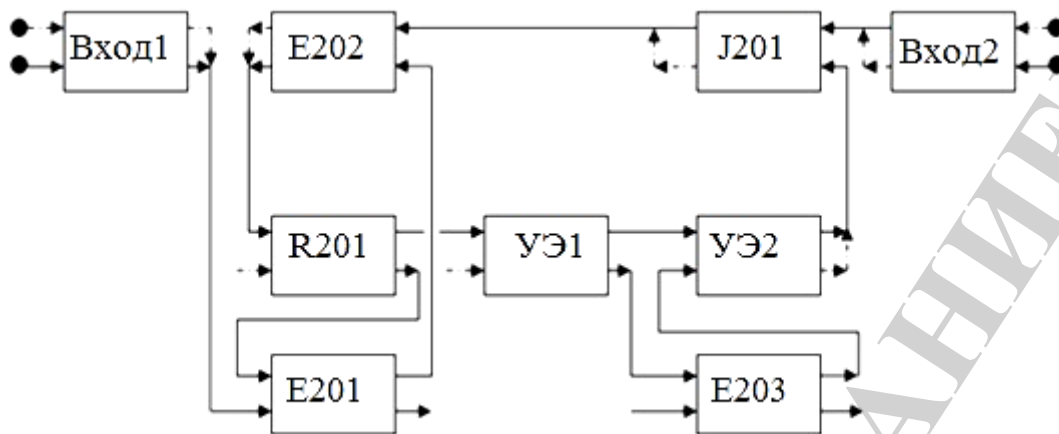


Рис. 7. Топология MEN схемы блока синтеза: УЭ1, УЭ2 – условные элементы; —→ – технологический поток; - - - -> – условный поток

Третий этап посвящается построению топологической HEN-модели блока синтеза. Как было отмечено ранее, в химико-технологических системах процессы в элементах схем протекают с наличием подвода и отвода тепла. Следовательно, топологическая MEN-модель схемы блока синтеза, должна быть пополнена сетями потоков утилит (рис. 8).

Четвертый этап предполагает построение топологической MEN/HEN-модели блока синтеза. В [22, 23] показано, что потоки массообменной сети представляют собой единую среду, взаимодействующую с потоками внешних теплоносителей. Объединим их в одну теплообменную сеть. Второй сетью будут потоки внешних утилит.

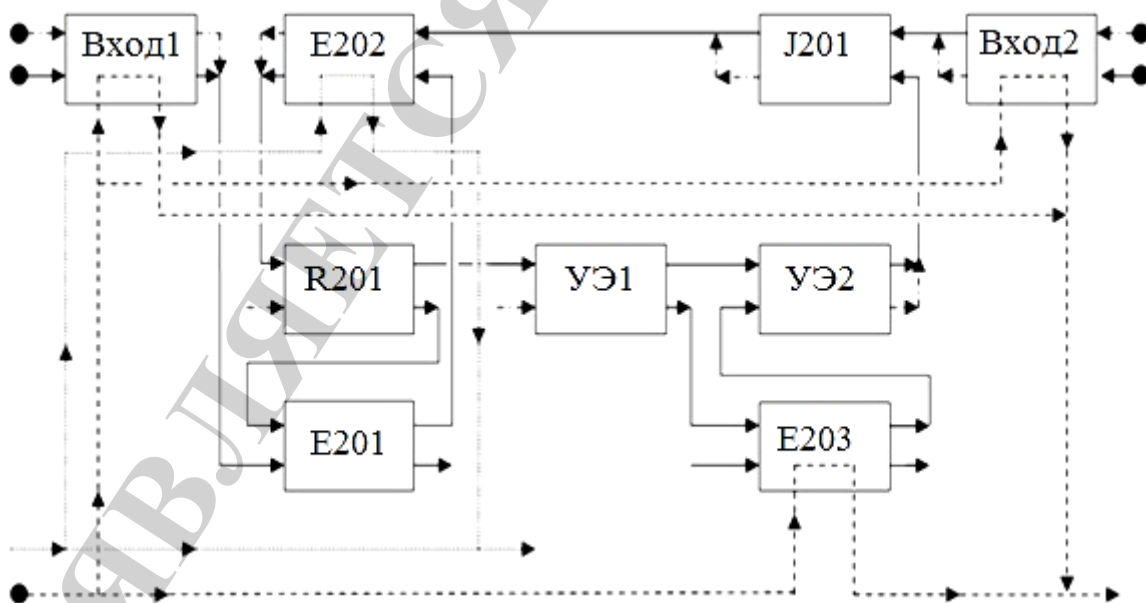


Рис. 8. Топология HEN схемы блока синтеза: —→ – технологический поток; —→ – пар; - - - -> – вода

Такой подход допускает сохранение принципа парности взаимодействия в элементах ХТС. Распределение же потоков в массообменной сети возможно определить из параметров модели массообменных процессов. На рис. 9 приведена объединенная топологическая MEN/HEN-модель блока синтеза.

Элементы, которые не имеют внешних источников или стоков тепла можем представить в модели в качестве узлов смешения и раздачи потоков учитывая эндо- и экзотермические, химические, а так же физические процессы. Поэтому колонна синтеза R201 на рис. 9 представлена узлом раздачи, а не элементом схемы.

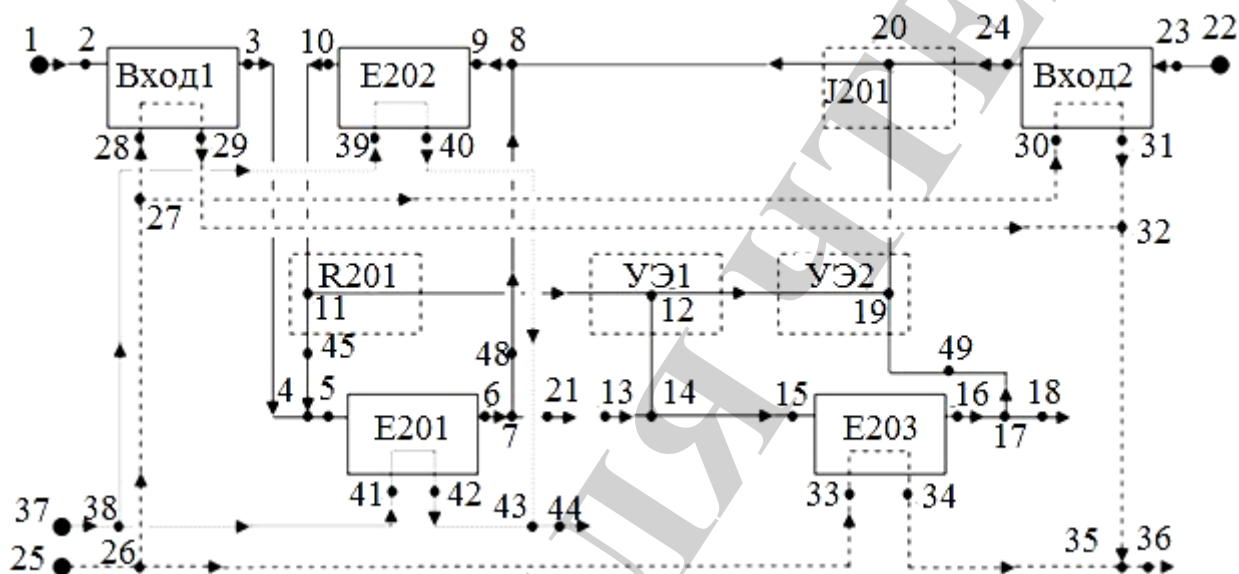


Рис. 9. Топология MEN/HEN схемы блока синтеза:
 —————> – технологический поток; ———> – пар; ·····> – вода

Как отмечалось в разделе 5, принятые принципы топологического представления системы и процессов в их элементах парным взаимодействием потоков позволяют:

- программно построить замкнутую модель тепломассообменных процессов;
- определить эффективности процессов в элементах системы;
- найти распределение потоков на её ветвях и температур в узлах сетей.

Такие представления позволяют построить программную среду, генерирующую математическую модель системы по её топологическому представлению, проанализировать различные варианты реализации технологической схемы процесса получения готовых продуктов, синтезировать оптимальный, энергоресурсосберегающий вариант производственного процесса.

С использованием моделирующего программного комплекса, разработанного немецкой компанией NETWORK SOLUTION DEVELOPMENT CO.INC и переданного для тестирования, был проведен численный эксперимент. В табл. 1 приведены результаты численного эксперимента.

Таблица 1

Расчетные значения массового расхода и температуры технологического потока в различных точках блока синтеза

| Наименование технологического потока | Номера точек на рис. 9 | Массовый расход потока, кг/с | Температура потока, °С |
|---|------------------------|------------------------------|------------------------|
| Вход в R-201 из E-202 | 10 | 40,938 | 167 |
| Выход из R-201 в E-201 | 45 | 37,296 | 183 |
| Выход из R-201 в E-203 | 46 | 3,6425 | 183 |
| Выход из R-201 в J-201 | 47 | 0 | – |
| Вход в E-201 из R-201 | 45 | 37,296 | 183 |
| Вход в E-201 из узла компрессии CO ₂ | 3 | 8,8344 | 100 |
| Выход из E-201 в E-202 | 48 | 24,387 | 180 |
| Выход из E-201 в C-303 | 21 | 21,743 | 180 |
| Вход в E-202 из E-201 | 48 | 24,387 | 180 |
| Вход в E-202 из J-201 | 20 | 16,551 | 104,5 |
| Выход из E-202 в R-201 | 10 | 40,938 | 167 |
| Вход в E-203 из сборника УАС V-301 | 13 | 7,1125 | 69 |
| Вход в E-203 из R-201 | 46 | 3,6425 | 183 |
| Выход из E-203 в J-201 | 49 | 9,9953 | 160 |
| Выход из E-203 в C-701 | 18 | 0,75972 | 160 |
| Вход в J-201 из R-201 | 47 | 0 | - |
| Вход в J-201 из E-203 | 49 | 9,9953 | 160 |
| Вход в J-201 из узла компрессии NH ₃ | 24 | 6,5556 | 20 |
| Выход из J-201 в E-202 | 20 | 16,551 | 104,5 |

Численный эксперимент проводился с использованием эффективностей тепло- и массообмена, значения которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения эффективностей тепло- и массообмена элементов системы

| Наименование элемента схемы | Эффективность теплообмена | Эффективность массообмена |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| R-201 | 0 | 0,912 |
| E-201 | 0,8675 | 0,28 |
| E-202 | 0,1888 | 0,596 |
| E-203 | 0,4724 | 0,591 |
| J-201 | 0 | 0,664 |

Массовые расходы потоков, получаемые в численном эксперименте, соответствовали их значениям в опорных точках технологической схемы для про-

ектного режима. Погрешность определения потоков не превышала 2,4 %, на ветвях, а значения температур в узлах строго соответствовали технологическому регламенту.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Достоинством исследования являются представления о топологической модели и ее элементах, разработанные правила построения блок-схем, условные обозначения аппаратов и методика изображения химико-технологических систем. Это позволяет любую инженерную схему преобразовать в ее топологическое представление в виде сетей, объединяемых элементами с парным взаимодействием потоков для организации процессов тепло- и массообмена в системе.

В отличие от аналогов [5–10] при моделировании массообмена применяется переход от химической задачи к физической. Используются расходные характеристики потоков вместо объемных концентрации реагирующих компонент, которые в заданных узлах ХТС трудно определить в производственных условиях.

Построенные математические модели тепло- и массообменных сетей химических производств, являются доказательством, что задачи анализа и синтеза ХТС можно решить с минимумом информации о системе. Имея исходные входные данные, получаем данные на выходе из элемента, не затрагивая происходящие в нем процессы. Представлена функция связи, позволяющая обрабатывать экспериментальные данные. Данная концепция позволяет воспринимать информацию в виде алгоритмов, приемлемых для разработки программного обеспечения, с целью автоматизировать схему построения системы уравнений.

Weaknesses. Необходимость экспертной оценки при определении направления массовых и энергетических потоков и значения режимных параметров на входе и выходе в систему. Для повышения достоверности математического моделирования процессов в ХТС при численном эксперименте необходимо знание теплофизических свойств веществ в широком диапазоне температур и давлений. Однако пока не существует достаточно универсальных уравнений состояния и они еще плохо приспособлены для конкретных практических приложений.

Opportunities. Дальнейшие цели исследования связаны с анализом, проектированием и синтезом ХТС. Анализ системы или поверочный расчет позволяет проводить ее анализ, определяя энергопотенциал системы. При проектировании системы учитываются возможные влияния на окружающую среду, безопасность и т. д. Синтез системы возникает как подчиненная задача при проектировании и анализе систем и позволяет путем изменения ее структуры и технологических параметров повысить энергоэффективность.

Threats. Сложность использования настоящего исследования заключается в отсутствии заинтересованности украинских предприятий в проведении анализа эффективности энергоемких процессов химической технологии. Это требует дополнительных затрат, а экономический эффект от рекомендаций по структурно-параметрической оптимизации технологической схемы будет получен только после модернизации производства.

В ведущих странах многие энергокомпании поняли, что потерю прибыли из-за уменьшения спроса вполне можно компенсировать путем диверсификации видов экономической деятельности, в том числе проведения энергоаудита и энергоменеджмента.

Впрочем, обращает на себя внимание то, что на протяжении последних нескольких лет показатель энергоемкости остается почти неизменным. Между тем Энергетическая стратегия Украины на период до 2030 г. предусматривает, что через 15 лет показатель энергоемкости в стране должен составить 0,22 т.у.т. и потребуются на это около \$24 млрд.

Для достижения такого результата важны не только деньги, необходима кардинальная ревизия подходов к организации производственных процессов. Иначе совершить такой прорыв невозможно.

8. Выводы

1. Выработаны правила построения топологических моделей массообменных и теплообменных сетей для технологических схем ХТС в предположении парности взаимодействия потоков в элементах системы.

2. Определены критерии эффективности массообмена и энергообмена, элементов системы для анализа её работоспособности в целом. Разработаны принципы построения и созданы математические модели массообменных и теплообменных сетей химических производств, основанные на уравнениях баланса и эффективностей тепло- и массопереноса.

3. Разработаны принципы построения и созданы объединенные топологическая и математическая HEN/MEN-модели блока синтеза карбамида.

Построенная концепция позволяет воспринимать информацию в виде алгоритмов, приемлемых для разработки программного обеспечения, с целью автоматизировать схему построения системы уравнений.

4. Выполнена проверка на адекватность разработанных представлений HEN/MEN моделирования на примере технологической схемы блока синтеза производства карбамида. Проведенный численный эксперимент позволил определить энергопотенциал технологической схемы и указал на возможности повышения энергоэффективности производства путем использования тепла общего производственного цикла.

5. Рассмотрена возможность включения в структуру технологической схемы производства карбамида дополнительного контура для подогрева технологического потока, объединяющего колонну синтеза R201, дополнительный теплообменник и водяной конденсатор. Повышение температуры потока на входе в блок выпарки в соответствии с технологическим регламентом в диапазоне 91...106 °С снижает расход пара низкого давления \approx на 1,2 т/ч.

Литература

1. Yee, T. F. Simultaneous optimization models for heat integration – I. Area and energy targeting and modeling of multi-stream exchangers [Text] / T. F. Yee, I. E. Grossmann, Z. Kravanja // Computers & Chemical Engineering. – 1990. – Vol. 14, № 10. – P. 1151–1164. doi:10.1016/0098-1354(90)85009-y
2. Yee, T. F. Simultaneous optimization models for heat integration – II. Heat exchanger network synthesis [Text] / T. F. Yee, I. E. Grossmann // Computers & Chemical Engineering. – 1990. – Vol. 14, № 10. – P. 1165–1184. doi:10.1016/0098-1354(90)85010-8
3. Ji, S. Design of Crude Distillation Plants with Vacuum Units. II. Heat Exchanger Network Design [Text] / S. Ji, M. Bagajewicz // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2002. – Vol. 41, № 24. – P. 6100–6106. doi:10.1021/i e011041m
4. Yan, Q. Synthesis of highly controllable heat integration systems [Text] / Q. Yan, J. Xiao, Y. Huang // Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers. – 2006. – Vol. 37, № 5. – P. 457–465.
5. SimSci PRO/II [Electronic recourse] // Schneider Electric Software, LLC. – 2015. – Available at: \www/URL: <http://software.schneider-electric.com/products/simsci/design/pro-ii/>
6. Optimize Hydrocarbon Processes with Aspen HYSYS® [Electronic recourse] // Aspen Technology, Inc. – 2016. – Available at: \www/URL: <http://www.aspentech.com/hysys/>
7. Zagruzka informatsii o programme [Electronic recourse] // Modelirovanie v neftegazovoi otrasli. GIBBS. – 2014. – Available at: \www/URL: <http://www.gibbsim.ru/node/33>
8. Process Simulation Software for Natural Gas and Oil Engineering [Electronic recourse] // Scientific & Technical Firm THERMOGAS Ltd. – 2016. – Available at: \www/URL: <http://thermogas.kiev.ua/Products.htm>
9. Gartman, T. R. Analiticheskii obzor sovremennykh paketov modeliruiushchih programm dlia kompiuternogo modelirovaniia himiko-tehnologicheskikh sistem [Text] / T. P. Gartman, F. S. Sovetin // Uspehi v himii i himicheskoi tehnologii. – 2012. – Vol. 26, № 11 (140). – P. 117–120.
10. HYSIM [Electronic recourse] // Water Resource Associates. – 2015. – Available at: \www/URL: <http://www.watres.com/software/HYSIM/>
11. Rohani, Y. A. A Novel Application of Pinch Technology in Air Pollution Analysis [Text] / Y. A. Rohani, A. R. Naderpour, B. B. Dabir, M. H. Panjehshahi // Proceedings of International Conference on Environmental Science and Technology (ICEST 2011). – 2011. – Vol. 6. – P. 430–439.
12. Chegini, S. Modification of Preheating Heat Exchanger Network in Crude Distillation Unit of Arak Refinery Based on Pinch Technology [Text] / S. Chegini, R. Dargahi, A. Mahdavi // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. – 2008. – P. 123–127.
13. Hasan, M. M. F. Synthesis of heat exchanger networks with nonisothermal phase changes [Text] / M. M. F. Hasan, G. Jayaraman, I. A. Karimi,

H. E. Alfadala // *AIChE Journal*. – 2009. – Vol. 56, № 4. – P. 930–945. doi:10.1002/aic.12031

14. Hasan, M. M. F. Synthesis of Heat Exchanger Networks Involving Phase Changes [Text] / M. M. F. Hasan, I. A. Karimi, H. E. Alfadala // *Proceedings of the 1st Annual Gas Processing Symposium*. – 2009. – P. 185–192.

15. Paengjuntuek, W. Heat Recovery from Process to Process Exchanger by Using Bypass Control [Text] / W. Paengjuntuek, C. Kiatpiriya, H. Phungrassami, P. Saikhwan // *World Applied Sciences Journal*. – 2009. – Vol. 6, № 7. – P. 1008–1016.

16. Li, L.-J. Separation network design with mass and energy separating agents [Text] / L.-J. Li, R.-J. Zhou, H.-G. Dong, I. E. Grossmann // *Computers & Chemical Engineering*. – 2011. – Vol. 35, № 10. – P. 2005–2016. doi:10.1016/j.compchemeng.2010.10.013

17. Linnhoff, B. Synthesis of heat exchanger networks: II. Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality [Text] / B. Linnhoff, J. R. Flower // *AIChE Journal*. – 1978. – Vol. 24, № 4. – P. 642–654. doi:10.1002/aic.690240412

18. Linnhoff, B. The pinch design method for heat exchanger networks [Text] / B. Linnhoff, J. R. Flower // *Chemical Engineering Science*. – 1983. – Vol. 38, № 5. – P. 745–763. doi:10.1002/aic.690240412

19. Foo, C. Y. Synthesis of mass exchange network for batch processes – Part I: Utility targeting [Text] / C. Y. Foo, Z. A. Manan, R. M. Yunus, R. A. Aziz // *Chemical Engineering Science*. – 2004. – Vol. 59, № 5. – P. 1009–1026. doi:10.1016/j.ces.2003.09.043

20. Cardonaalzate, C. Energy consumption analysis of integrated flowsheets for production of fuel ethanol from lignocellulosic biomass [Text] / C. Cardonaalzate, O. Sancheztoro // *Energy*. – 2006. – Vol. 31, № 13. – P. 2447–2459. doi:10.1016/j.energy.2005.10.020

21. Kafarov, V. V. Analiz i sintez himiko-tehnologicheskikh sistem [Text]: Handbook / V. V. Kafarov, V. P. Meshalkin. – Moscow: Khimiia, 1991. – 432 p.

22. Yakovleva, O. Yu. Modelirovanie massoobmena v HTS [Text] / O. Yu. Yakovleva, M. G. Khmelniuk, G. V. Derevianko, Yu. A. Yakovlev // *Refrigeration engineering and technology*. – 2011. – № 4 (132). – P. 82–86.

23. Yakovleva, O. Yu. Otsenka effektivnosti mezhsetevogo energoobmena [Text] / O. Yu. Yakovlev, M. G. Khmelniuk, A. Yu. Yakovlev // *Refrigeration engineering and technology*. – 2008. – № 6 (116). – P. 25–27.

24. Yakovleva, O. Yu. Modelirovanie i analiz effektivnosti proizvodstvennoi shemy polucheniia karbamida [Text] / O. Yu. Yakovleva, M. G. Khmelniuk, G. V. Derevianko, Yu. A. Yakovlev // *Refrigeration engineering and technology*. – 2010. – № 4 (132). – P. 60–65.