

УДК 621:664(076)

Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»,
Л.М. УЛЬЕВ, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»,
И.Б. РЯБОВА, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»,
А.А. КОВАЛЬЧУК, студент, НТУ «ХПИ»

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ СМЕСИ МЕТАНОЛ-ЭТАНОЛ

У даній роботі розглядається процес та принцип теплоенергетичної інтеграції. Вона полягає у розташуванні теплообмінних апаратів вище і нижче пінча таким чином, щоб вся теплота гарячих потоків була передана холодним, тобто рекуперована. Якщо після їх розташування залишиться нереалізоване навантаження, то його реалізують завдяки утилітам

В данной работе рассматривается процесс и принцип теплоэнергетической интеграции. Она состоит в расположении теплообменных аппаратов выше и ниже пинча таким образом, чтобы вся теплота горячих потоков была передана холодным, т.е. рекуперирована. Если после их расположения останется нереализованная нагрузка, то его реализуют благодаря утилитам

In this work is examined process and principle of heat-energy integration. It consists in the location of heat-exchange vehicles higher and below pinch so that all warmth of hot streams was passed by cold, that recuperation. If the unrealized loading will stop behind after their location, then it will be realized due to utilities

Постановка задания. На обычной технологической схеме очень трудно провести разделение ХТС на подсистему находящуюся выше пинча и подсистему ниже пинча. Для того чтобы синтезировать интегрированную систему теплообмена рассматриваемых процессов, строится сеточная диаграмма технологических потоков с указанием локализации пинча. На сеточной диаграмме уже значительно проще определить количество теплообменных связей, а так же нагрузку и температуру потоков на выходе из теплообменников.

Анализ последних исследований и публикаций. Известно, что область пинча делит систему технологических потоков на две термодинамические подсистемы, каждая из которых находится в тепловом равновесии со своими утилитами, т.е. в тепловой сети с максимальной рекуперацией энергии для данного ΔT_{min} и минимальным потреблением внешней энергии. Нужно также запретить передачу тепловой энергии через пинч. Для этого, используя правила и методы пинч-анализа, выполняются отдельно проекты тепловых сетей выше пинча и ниже пинча, а затем сшиваются на темпера-

турах пинча [1]. В области пинча действуют наименьшие движущие силы теплопередачи, поэтому это самая стеснённая область для возможных размещений рекуперативных теплообменников. На всех теплообменных аппаратах в районе пинча ΔT_{\min} должно быть одинаково. Сначала размещают теплообменники в подсистеме выше пинча, двигаясь от пинча в левую сторону [2]. Также необходимо чтобы выполнялось CP правило для подсистемы выше пинча $CP_H \leq CP_C$, т.е. для того чтобы температурная разность между теплоносителями в теплообменниках, размещённых вблизи пинча и выше него, не уменьшалась.

Изложение основного материала исследований. Начинать размещение необходимо с горячего потока, имеющего максимальную потоковую теплоёмкость. В партнёры ему подбирают холодный поток также с максимальной потоковой теплоёмкостью. Затем переходят к рассмотрению горячего потока, но уже с меньшей потоковой теплоёмкостью и процесс повторяется. После того как все горячие потоки будут рассмотрены переходят к подсистеме ниже пинча. В подсистеме ниже пинча теплообменники начинают расставлять от пинча и двигаются вправо. Определив холодный поток, с наибольшей потоковой теплоёмкостью, подбираем ему партнёра среди горячих потоков так, чтобы выполнялось условие $CP_H \geq CP_C$. Далее переходят к рассмотрению холодного потока с меньшей потоковой теплоёмкостью и процесс повторяется. Необходимо помнить, что размещение теплообменника на пинче возможно только для тех потоков, у которых потоковая теплоёмкость входящего в пинч потока, не превышает потоковой теплоёмкости, выходящего из пинча потока, или $CP_{IN} \leq CP_{OUT}$ [2].

Построение сеточной диаграммы. Построение начинается с изображения горячих и холодных потоков в горизонтальной плоскости, с последующим их разделением на две подсистемы в области пинча. Эти подсистемы имеют название «выше пинча» и «ниже пинча» (рис. 1).

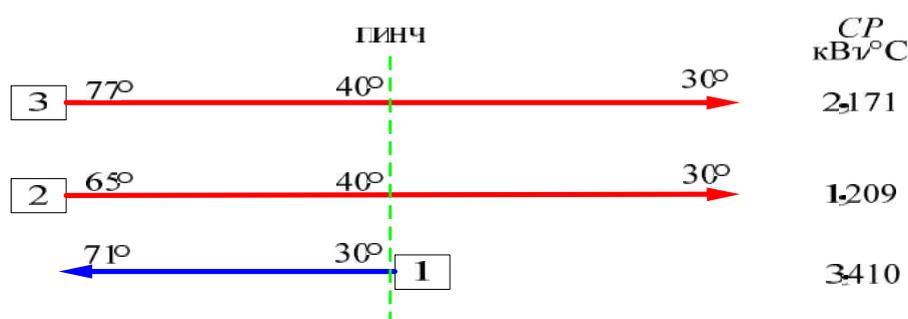


Рис. 1. Сеточная диаграмма технологической системы ректификации смеси метанол-этанол: 1-холодный поток; 2,3-горячие потоки; CP -потоковая теплоёмкость

Сеточная диаграмма построена на основе данных, которые были рассмотрены в статье «Определение энергосберегающего потенциала для процесса ректификации смеси метанол-этанол». Выше пинча вся теплота горячих потоков может быть рекуперирована холодным потоком. Это значит, что выше пинча потоки должны быть приведены к температуре пинча с помощью теплообмена с холодным потоком.

Рассмотрим подсистему, которая находится выше пинча. Для того, чтобы выше пинча осуществить рекуперацию тепловой энергии горячих потоков холодными, необходимо, чтобы количество горячих потоков было меньше или равнялось числу холодных потоков. Это условие для данной технологической схемы не выполняется, поэтому рощепляем холодный поток на два параллельных потока (рис. 2). При этом поточную теплоемкость холодного потока $CP_1 = 3,410$ кВт/°С разделяем на две теплоемкости. В итоге получили $CP_{1,1} = 1,21$ кВт/°С и $CP_{1,2} = 2,2$ кВт/°С.

Размещение начинаем с горячего потока № 3, т.к. он имеет максимальную потоковую теплоёмкость $CP_3 = 2,171$ кВт/°С. Находим ему партнёра для теплообмена среди холодных потоков, при этом, чтобы выполнялось условие (1).

$$CP_H \leq CP_C \quad (1)$$

где CP_C и CP_H – потоковая теплоёмкость холодного и горячих потоков, кВт/°С. Для горячего потока № 3 – это холодный поток № 1.2 с потоковой теплоёмкостью $CP_{1,2} = 2,2$ кВт/°С.

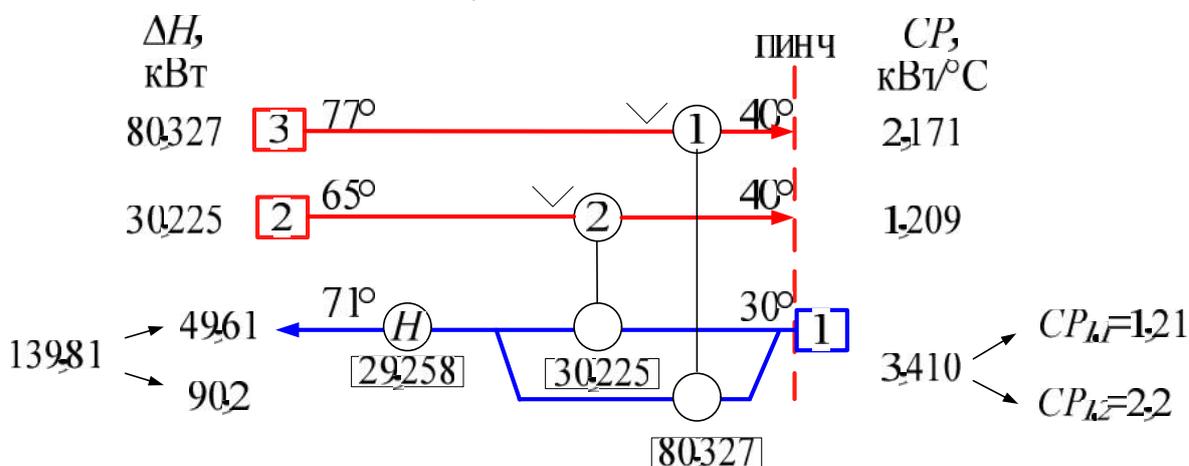


Рис. 2. Подсистема выше пинча:

1 – холодный поток; 2,3 – горячие потоки; H – нагреватель; 1,2 – теплообменники

Таким же образом подбираем партнера к горячему потоку № 2, с потоковой теплоёмкостью $CP_2 = 1,209$ кВт/°С, холодный поток № 1.1, с потоковой теплоёмкостью $CP_{1.1} = 1,21$ кВт/°С. Чтобы сократить количество теплообменных аппаратов используется принцип максимальной нагрузки каждого рекуперативного теплообменника в тепловой сети технологической системы. Для того, чтобы максимизировать нагрузку в теплообменниках вычисляют изменение потоковой энтальпии каждого потока (2). Изменение энтальпии горячих потоков:

$$\Delta H_N = CP_N \cdot (T_{PH} - T_{SN}) \quad (2)$$

где N – номер потока; T_{PH} – горячая температура пинча °С; T_{SN} – температура снабжения °С. Изменение энтальпии горячего потока № 2 и № 3 (по уравнению 2):

$$\Delta H_2 = 1,209 \cdot (65 - 40) = 30,225 \text{ кВт}$$

$$\Delta H_3 = 2,171 \cdot (77 - 40) = 80,327 \text{ кВт}$$

Изменение энтальпии холодных потоков (3):

$$\Delta H_N = CP_N (T_{TS} - T_{PC}) \quad (3)$$

где N – номер потока; T_{PC} – холодная температура пинча °С; T_{TS} – целевая температура °С. Изменение энтальпии холодных потоков № 1.1 и № 1.2 (по уравнению 3):

$$\Delta H_{1.1} = 1,21 \cdot (71 - 30) = 49,61 \text{ кВт}$$

$$\Delta H_{1.2} = 2,2 \cdot (71 - 30) = 90,2 \text{ кВт}$$

Записываем эти значения на сеточной диаграмме рядом с соответствующими потоками. Максимизируем тепловую нагрузку теплообменного аппарата, размещенного на потоках № 3 и № 1.2. В этом случае минимальное изменение энтальпии горячего потока равняется $\Delta H_3 = 80,327$ кВт, поэтому и тепловая нагрузка этой теплообменной связи будет равняться 80,327 кВт. Отметим поток № 3. Максимизируем тепловую нагрузку теплообменного аппарата, размещенного на потоках № 2 и

№ 1.1. В этом случае минимальное изменение энтальпии горячего потока равняется $\Delta H_2 = 30,225$ кВт, поэтому и тепловая нагрузка этой теплообменной связи будет равняться 30,225 кВт. Отметим поток № 2. Запишем значение тепловых нагрузок под соответствующим изображением теплообменного аппарата на сеточной диаграмме (рис. 2).

После размещения на сеточной диаграмме двух теплообменников у нас осталась неудовлетворённая нагрузка на холодном потоке № 1, необходимая для нагревания первого потока, после второго и первого теплообменника, к его целевой температуре, которая равняется 71 °С. Определяем эту мощность (4):

$$\begin{aligned} \Delta H_{1,1} &= \Delta H_F - \Delta H_2 \\ \Delta H_{1,2} &= \Delta H_F - \Delta H_3 \\ \Delta H_{1,1} &= 49,61 - 30,225 = 19,385 \text{ кВт} \\ \Delta H_{1,2} &= 90,2 - 80,327 = 9,873 \text{ кВт} \\ \Delta H_{\text{общ.}} &= 9,873 + 19,385 = 29,258 \text{ кВт} \end{aligned} \tag{4}$$

где ΔH_F – нагрузка на расщеплённых потоках кВт; $\Delta H_{\text{общ}}$ – нагрузка необходимая для нагрева холодного потока кВт. Вся теплота горячих потоков под пинчём уже рекуперирована холодными, с помощью размещения двух теплообменников. Поэтому, чтобы привести поток № 1 к его целевой температуре, нам необходимо использовать горячие утилиты, например, нагреть поток паром. Отмечаем это на сеточной диаграмме (рис. 2).

Рассмотрим подсистему, которая находится ниже пинча. Вычислим изменение поточной энтальпии горячих потоков в подсистеме ниже пинча (2):

$$\begin{aligned} \Delta H_3 &= 2,171 \cdot (40 - 30) = 21,71 \text{ кВт} \\ \Delta H_2 &= 1,209 \cdot (40 - 30) = 12,09 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Для того, чтобы привести потоки № 2 и № 3 к их целевым температурам, необходимо использовать холодные утилиты, например, охладить потоки водой. Отмечаем это на сеточной диаграмме (рис. 3).

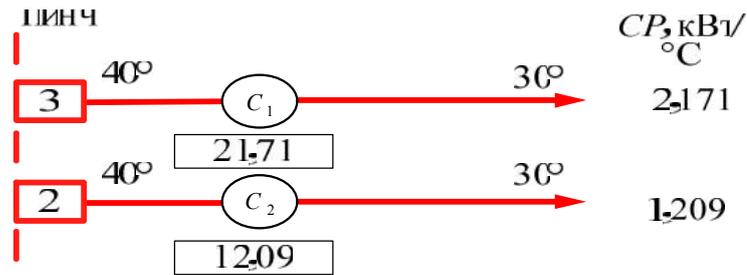


Рис. 3. Подсистема ниже пинча: 2,3 – горячие потоки; C_1, C_2 – охладители

Далее определяются температуры потоков на горячей и холодной стороне установленных теплообменников. Используя уравнение баланса энтальпии, вычисляем отсутствующие температуры. Уравнение баланса энтальпии (5) для теплообменника № 2 на втором потоке с теплоемкостью $CP_{1,1}=1,21$ кВт/°С имеет вид:

$$CP_{1.1} \cdot (T_{\text{вых}1.1} - T_{PC}) = 30,225 \text{ кВт}. \quad (5)$$

Откуда температура холодного теплоносителя на горячей стороне теплообменника № 2 определится величиной:

$$T_{\text{вых}1.1} = 30 + 30,225/1,21 = 54,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Уравнение баланса энтальпии (6) для теплообменника № 1 на третьем потоке с теплоемкостью $CP_{1,2}=2,2$ кВт/°С имеет вид:

$$CP_{2.2} \cdot (T_{\text{вых}1.2} - T_{PC}) = 80,327 \text{ кВт}. \quad (6)$$

Откуда температура холодного теплоносителя на горячей стороне теплообменника № 1 определится величиной:

$$T_{\text{вых}1.2} = 30 + 80,327/2,2 = 66,51 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Уравнение баланса энтальпии (7) для нагревателя Н на первом потоке с теплоемкостью $CP_1 = 3,410$ кВт/°С имеет вид:

$$CP_1 \cdot (T_{\text{вх}1} + T_{PC}) = 29,258 \text{ кВт}. \quad (7)$$

Откуда температура смеси перед входом в нагревателя Н определится величиной:

$$T_{\text{вх}1} = 71 - 29,258/3,410 = 62,42 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Показываем это на сеточной диаграмме (рис. 4).

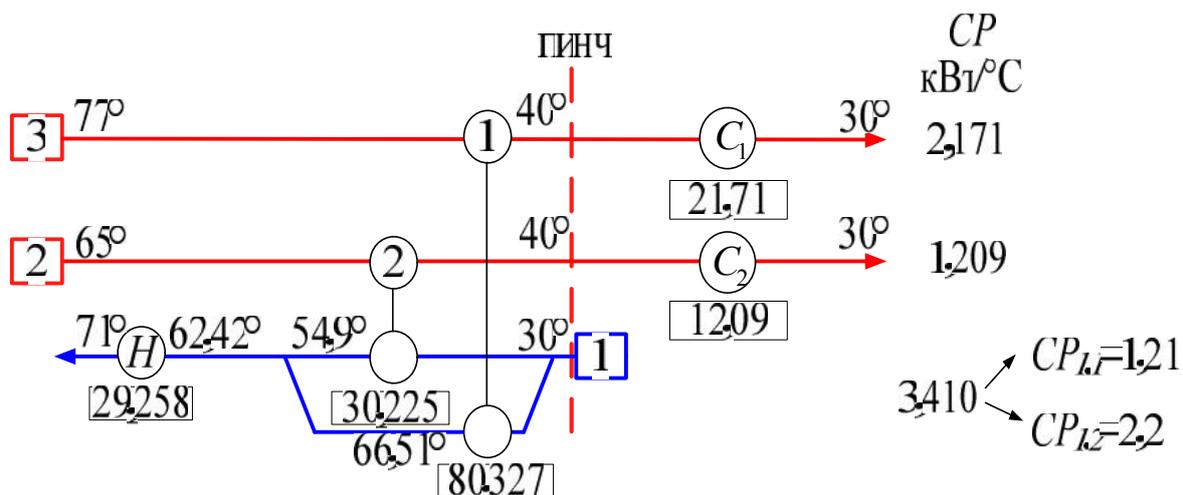


Рис. 4. Сеточная диаграмма технологических потоков и связующих их теплообменников в технологической системе ректификации: 1 – холодный поток; 2,3 – горячие потоки; H – нагреватель; C_1, C_2 – охладители

Таким образом, проектирование системы теплообмена выше пинча и ниже пинча закончено. В результате сделанной работы получены данные – табл. 1.

Таблица 1

Сравнение энергетических характеристик, существующей и предлагаемой в проекте реконструкции теплообменных сетей

Технологическая схема	Горячие утилиты $Q_{Hmin}, \text{кВт}$	Холодные утилиты $Q_{Cmin}, \text{кВт}$
До реконструкции	139,81	144,35
После реконструкции	29,258	33,80

В результате выполненной работы была получена оптимизация теплообменной сети процесса ректификации для избранных целевых функций (рис.4).

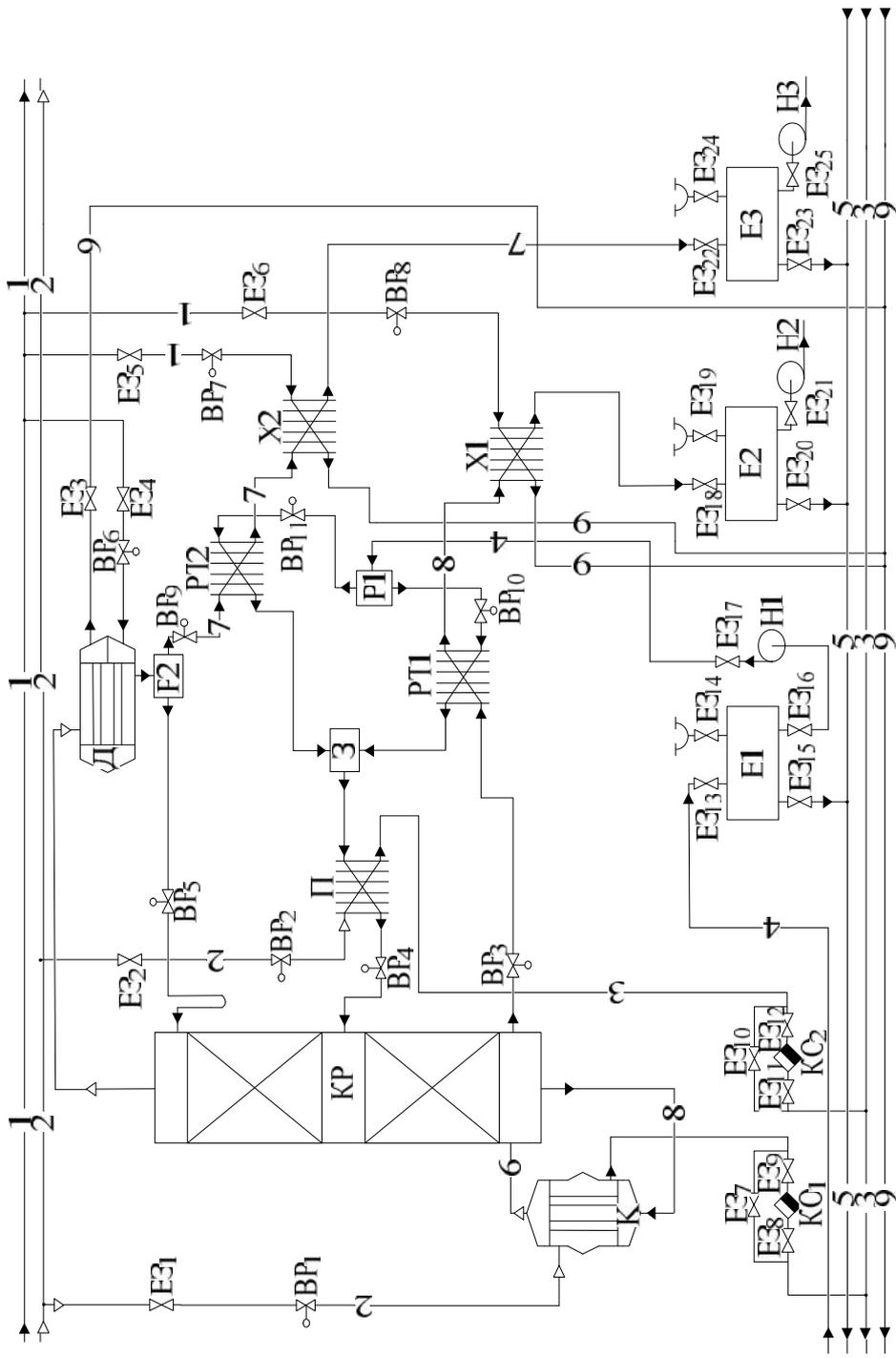


Рис. 5. Развёрнутая энерготехнологическая схема ректификации 1 → Вода сбортня; ЕХДН; 2 → газ; 3 → конденсат; 4 → исходная смесь; 5 → канализация; 6 → прожидкостная муляжь; 7 → дистилля; 8 → кубовый остаток; 9 → вода сбортня; ЯБ; ХДН; 10 → газ; дистилля; КР – юлона ректификации; Д – дефлегматор; П – подогреватель; Х1, Х2 – холодильники; Е1, Е3 – ёмкости; Р1, Е2 – разделитель; Н1, Е3 – насос; ВР1 – вентиль регулирующий; Е3, Е35 – вентиль запорный; КС1, КС2 – конденсатотводчик; К – впитыватель; РП1, РП2 – Теплообменник регуляционный; С – Смеситель.

Для заданного значения ΔT_{min} методами пинч-проектирования синтезирована технологическая схема теплообменной системы. Создание рекуперативной системы установки по предлагаемой схеме (рис.4) позволит снизить мощность горячих утилит до $\sim 29,258$ кВт, и мощность холодных до $\sim 33,8$ кВт. Так же необходимо помнить, что основной показатель экономической эффективности разработанной пинч системы – срок окупаемости капитальных вложений, который показывает, за сколько лет разовые капитальные вложения окупятся, за счет ежегодного прироста чистой прибыли предприятия. Расчёт срока окупаемости (8):

$$T_{OK} = K/\Delta\Pi_{Гч}, \quad (8)$$
$$T_{OK} = 331770/126220 = 2,6 \text{ лет.}$$

где T_{OK} – срок окупаемости проекта; $\Delta\Pi_{Гч}$ – годовая чистая прибыль предприятия; K – капитальные затраты предприятия. Но срок окупаемости 2,6 лет для предприятия, будет только при цене на газ 2500 грн. за 1000 м^3 , если же цена увеличится или уменьшится, срок окупаемости, соответственно, тоже изменится.

На основе сеточной диаграммы была спроектирована развёрнутая энерго-технологическая схема процесса ректификации (рис. 5).

Выводы. Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что сеточная диаграмма:

1. ясно показывает локализацию и значение пинча;
2. позволяет выполнить полный проект без изменения маршрута технологических потоков.

Список литературы: 1. *Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Мешалкин В.П.*, Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем. Харьков: НТУ «ХПИ», – 2006. – 412 с. 2. *Ульев Л.М.*, Курс лекций по предмету: Интеграция тепло-энергетических процессов. Харьков: НТУ «ХПИ», – 2009. – 280 с.

Поступила в редколлегию 25.03.11