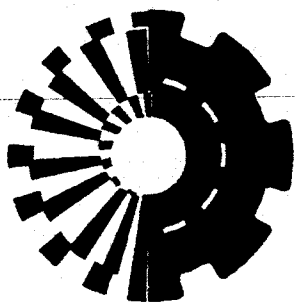


ВЕСТНИК



Харьковского
Государственного
Политехнического
Университета

Часть 2.

Механика.
Машиностроение.

ВЫПУСК 7.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

ВЕСТНИК

**Харьковского
государственного
политехнического
университета**

Выпуск 7

Часть 2. Механика. Машиностроение

Основан в 1984 г.

Харьков
ХПУ
1997

Таким образом, для уменьшения осевой гидродинамической силы на подвижном золотнике переливного клапана необходимо выполнить кольцевую канавку радиусом $R1'$ на его дросселирующей кромке, а вторую — конусной, с углом конусности α из указанного выше диапазона значений.

Предложенные положения, выводы и рекомендации могут быть использованы проектировщиками золотниковых гидроаппаратов, а результаты исследований переливного клапана внедрены в проектно-конструкторские разработки КБ, НИИ, научно-производственных фирм.

Список литературы: 1. *Башта Т. М.* Гидравлические следящие приводы. — Минск.: Гос. научн.-техн. изд-во машиностроит. лит-ры, 1960.—282 с. 2. *Гамынин Н. С.* Гидравлический привод систем управления.—М.: Машиностроение, 1972.—376 с. 3. *Клиной В. В.* Параметрический синтез дросселирующего стабилизирующего устройства с помощью ЭЦВМ // Вестн. Харьковск. политехн. ин-та.—1989.—№ 266, Машиностроение.— С.49—57.

Поступила в редколлегию 04.02.97

*Б. Ферст, д-р Й. Клемеш (Манчестер, Великобритания),
Л. Л. Товажнянский, д-р техн. наук, П. А. Капустенко, канд.
техн. наук, Л. М. Ульев, канд. техн. наук, А. Ю. Перевертайленко,
Б. Д. Зулин*

ПРИМЕНЕНИЕ PINCH - АНАЛИЗА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ УСТАНОВКИ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

Основная доля стоимости энергии, потребляемой на НПЗ, приходится на топливо, сжигаемое в печах на установках первичной переработки нефти. Для снижения затрат на НПЗ необходимо более рационально использовать тепловую энергию полученных продуктов.

Сырая нефть перед поступлением в предварительный эвапоратор подогревается в блоке теплообменников первичного подогрева. Величина рекуперированной энергии в этом блоке в значительной мере определяется расположением теплообменников на технологических потоках.

Задача синтеза теплообменных систем (ТС), обеспечивающих минимальное потребление энергии от внешних энергоносителей при подводе ее к

потребителю, является одной из наиболее сложных технических проблем, с которой приходится сталкиваться как при первоначальном проектировании, так и при реконструкции теплосистем промышленных установок.

Сравнение различных методов синтеза ТС [1] показало, что наиболее полно удовлетворяет указанным требованиям метод пинч-анализа, предложенный и развитый проф. Б. Линнхоффом (UMIST) [2—5]. Пинч-метод основан на термодинамическом анализе системы технологических потоков, а для экономической оптимизации используется немонотонная зависимость приведенной стоимости проекта от наименьшего температурного напора на теплообменном оборудовании [6]. При увеличении ΔT_{\min} на теплообменном оборудовании стоимость затрачиваемой энергии возрастает за счет недорекуперации теплоты, а стоимость самого оборудования снижается за счет уменьшения поверхности теплообмена, что и приводит к немонотонной зависимости суммарной годовой стоимости внешних теплоносителей и оборудования от ΔT_{\min} , а это, в свою очередь, позволяет определить оптимальное значение ΔT_{\min} и для него создавать проект.

Для определения оптимального ΔT_{\min} необходимо вычислить значения потребляемой и отводимой от проектируемого процесса энергии, а также величины поверхностей теплообмена, необходимых для размещения на технологических потоках. Для этого в пинч-анализе используется аппарат составных кривых [3].

Для построения составных кривых выясняются теплофизические и технологические данные потоков, участвующих в теплообмене, т.е. начальные и конечные температуры T_s , T_T , теплоемкости C и их массовые расходы M , что позволяет определить их потоковые теплоемкости $CP = M \cdot C$ и затем изменение их потоковых энтальпий в соответствующих температурных интервалах:

$$Q = \int_{T_s}^{T_T} CP \cdot dT = \Delta H, \text{ если } CP = \text{const, то } \Delta H = CP \cdot (T_T - T_s).$$

После этого каждый поток представим прямым отрезком на энтальпийно-температурной плоскости (если $CP = \text{const}$). Аналогично можно изобразить кривые для нескольких горячих или холодных потоков, суммируя CP потоков для каждого температурного интервала и затем вычисляя общее изменение энтальпии в них. Температурные интервалы определяются значениями температур T_{si} и T_{Ti} для соответствующих потоков.

Построение составных кривых достаточно просто алгоритмируется. Сначала вдоль энтальпийной оси последовательно строятся горячая и сразу за ней холодная составные кривые. Затем определяем расстояние между кривыми по энтальпийной оси во всех точках излома горячей кривой, для кото-

рых $(dT/dH)_{j+1} > (dT/dH)_i$, и холодной кривой, для которых $(dT/dH)_{j+1} < (dT/dH)_i$, определяем минимальное из таких расстояний и сдвигаем на эту величину холодную кривую влево.

Сейчас кривые соприкасаются в одной из точек, т. е. $\Delta T_{\min} = 0$, что физически соответствует максимальной рекуперации тепла, т. е. бесконечно большой поверхности теплообмена, что практически не выполнимо. Далее двигаем холодную кривую вправо до тех пор, пока в последней из указанных выше точек либо в крайних точках кривых расстояние между ними по температурной оси не станет равным ΔT_{\min} . После такого построения легко посчитать интересные нас мощности:

Место локализации ΔT_{\min} называется пинчем [4,5,7]. Энтальпийный интервал, на котором составные кривые перекрываются, показывает рекуперацию тепла в сети теплообменников для данной величины ΔT_{\min} . Неперекрывающийся энтальпийный интервал в верхней части кривых определяет мощность, подводимую внешними энергоносителями к технологическому процессу, в нижней части — мощность, которая должна быть отведена внешними хладагентами. Тем самым, еще до начала моделирования сети теплообменников, мы можем установить энергетические цели, которым должен удовлетворять окончательный проект [7].

При известной потребляемой и отводимой мощности и удельной стоимости энергоносителей легко вычислить общую стоимость энергоносителей, потребляемых теплоэнергетической системой. Стоимость теплообменников вычисляем, определяя поверхность теплообмена по величине максимальной рекуперации тепла. Далее с помощью итерационной процедуры определяется ΔT_{\min} оптимальное, соответствующее определенной целевой функции (минимум приведенных затрат, минимальное потребление энергии или минимальные капитальные вложения и т.д.).

Сырая нефть, поступающая на колонну атмосферного разделения, сначала нагревается от 30°C до 115°C в блоке теплообменников первичного подогрева горячими потоками мазута, бензина, керосина, тяжелого и легко дизельного топлива. Затем нефть подается на обессоливание, после чего нагревается до 210°—220°C вследствие теплообмена с горячим мазутом и нижними циркуляционными орошениями ректификационных колонн. Как правило, температура 220°C при этом не достигается, а верхний уровень температуры, связанный с технологическими ограничениями, равен 250°C.

Основная рекуперация тепла на установке происходит в блоке теплообменников первичного подогрева нефти. В обследованной теплосети существует еще несколько теплообменников, используемых для подогрева пото-

ков рециркуляции колонн.

В исследуемом случае на установке существует 26 технологических потоков. Потоки, теплоемкость которых значительно изменяется в зависимости от температуры, разделены на температурные сегменты, в пределах которых CP можно считать постоянными. Суммируя CP в температурных интервалах для соответствующих потоков, строим составные кривые для холодных и горячих потоков.

В действующей теплообменной сети $\Delta T_{\min} \approx 56^\circ\text{C}$, и, чтобы для этого значения определить потребляемую и отводимую с установки мощности, необходимо расположить эти кривые так, чтобы по оси T минимальное расстояние между ними было 56°C . После такого построения легко посчитать интересующие нас мощности (рис. 1а). Мощность трубчатых печей на действующей установке $Q_H = 76139$ мегаватт, а отвести от установки необходимо $Q_C = 60330$ мегаватт.

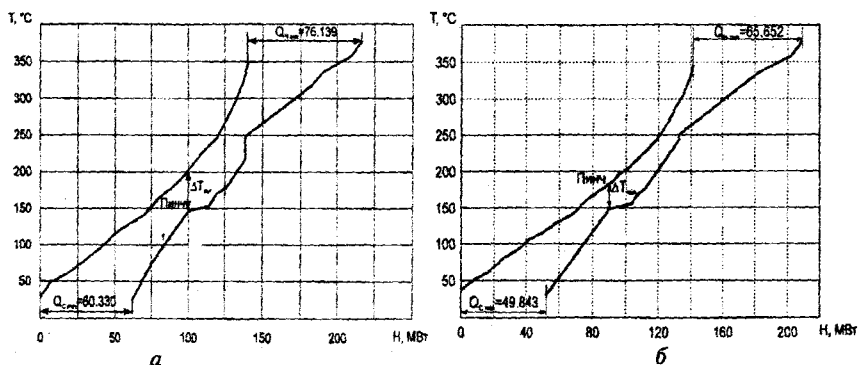


Рис. 1. Составные кривые:

а — существующей теплосети установки; б — построенные для $\Delta T_{\min} = 35^\circ\text{C}$. T — температура; H — поток энтальпии; Q_H — потребляемая мощность от горячих энергоносителей; Q_C — мощность, отводимая с установки; 1 — горячая составная кривая; 2 — холодная

Определение оптимального значения ΔT_{\min} для реконструкции установки переработки нефти с последующей окупаемостью вложенных средств в течение 10 месяцев дало величину $\Delta T_{\min} = 35^\circ\text{C}$. При этом принимались в расчет мировые цены на оборудование, его установку, эксплуатацию и используемую энергию. Построение составных кривых для $\Delta T_{\min} = 35^\circ\text{C}$ с учетом того, что нефть, поступающую на колонну атмосферного разделения, можно нагревать до 250°C , показало возможность уменьшения мощности печей на $10,5$ мВт (рис. 1б), т. е. на $\sim 15\%$ от существующего потребления энергии, но

при этом предполагается возможность полной интеграции потоков.

Выше отмечалось, что нагрев сырой нефти, поступающей на колонну К-1, возможен до 250°C, т.е. все возможные целевые температуры 13-го потока находятся выше температуры локализации пинча, а это свидетельствует о том, что топология тепловой сети, близкой к оптимальной, не будет изменяться в пределах возможного изменения целевой температуры 13-го потока.

Сеточная диаграмма для рассматриваемой установки представлена на рис. 2. Здесь показаны верхняя и нижняя температуры пинча, а косыми линиями обозначены размещения, переносящие теплоту через пинч.

Данная диаграмма теплообменной сети показывает, что существует перенос теплоты через пинч

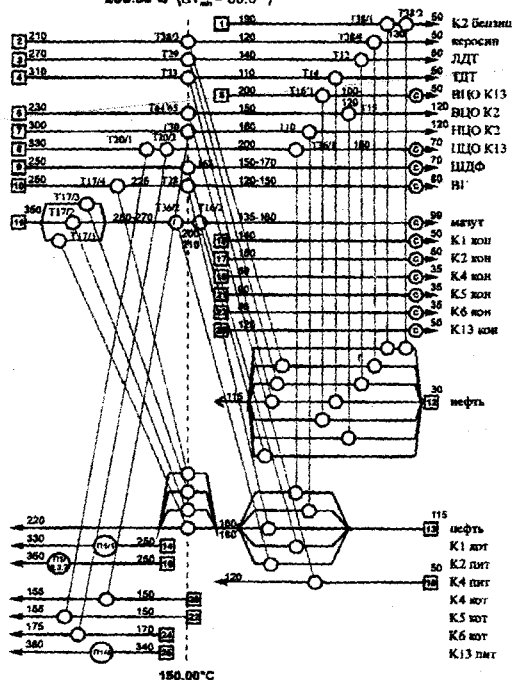


Рис. 2. Сеточная диаграмма существующей теплосети установки

(рис. 2). Для того чтобы исключить перенос тепла от горячих внешних энергоносителей к хладагентам, будем проектировать сеть теплообменников отдельно, выше и ниже пинча.

При этом на каждом размещении теплообменников необходимо стараться выдерживать $\Delta T_{\min} = 35^\circ\text{C}$, а для размещений на температуре пинча это должно быть строгим правилом. На размещенных теплообменниках должны выполняться *CP*-правила, т.е. $CP_{\text{hot}} \leq CP_{\text{cold}}$ выше температуры пинча и $CP_{\text{hot}} \geq CP_{\text{cold}}$ ниже [7], а также отношения $CP_{\text{hot}}/CP_{\text{cold}}$ на теплообменниках должны быть близки к этим соотношениям для составных кривых на верхней температуре пинча у теплообменников, размещенных выше пинча, и на нижней температуре пинча для теплообменников, размещенных ниже пинча [8].

Ниже пинча соотношение $(\sum CP_{\text{hot}}/CP_{\text{cold}})_{\text{пинч}} \sim 1,4$ на всем интервале перекрытия кривых, поэтому для размещений теплообменников его про-

сто выполнить. На верхней температуре пинча ($\sum CP_{hot}/CP_{cold}$)_{pinch} ~0,4, но на малом энтальпийном интервале. На большей части энтальпийного интервала выше пинча данное отношение ~1, поэтому и мы в основном будем придерживаться этой величины.

Один из возможных вариантов такого проекта представлен на рис. 3. Выше точки пинча изменения энтальпии у первых двух потоков незначительны по сравнению с другими, их можно не рассматривать при проектировании сети выше температуры пинча. Уже на этой стадии проектирования мы старались использовать существующую топологию рабочей сети теплообменников. Полученная тепловая сеть имеет 29 связей общей площадью 18300 м² вместо 24 размещений с поверхностью теплообмена 16800 м², т.е. на 9% больше.

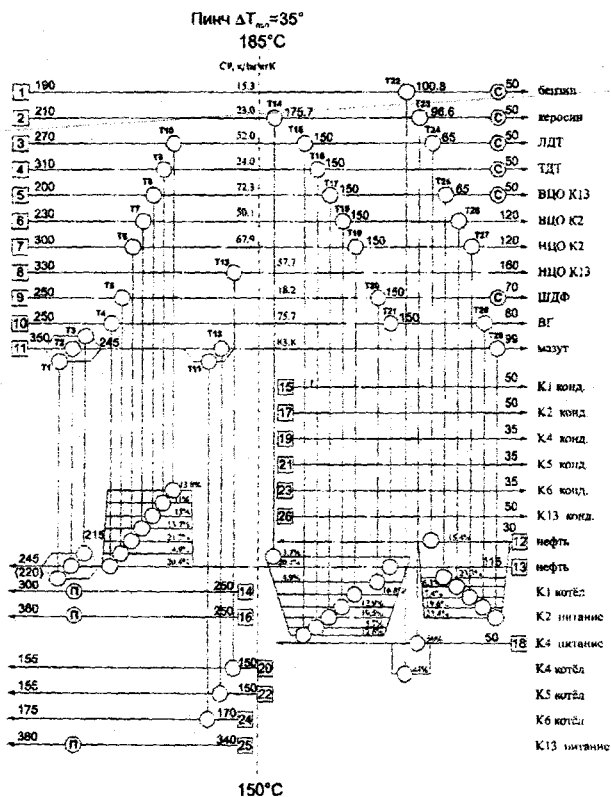


Рис. 3. Теплосеть, спроектированная при раздельном размещении теплообменников выше и ниже пинча. При расщеплении потоков показаны процентные соотношения потоковых теплоемкостей

При этом сырая нефть, поступающая на К-1, нагревается до 239°C, т.к. мощность печи П₁, подогревающей низ К-1, можно уменьшить на 7 мВт.

Дальнейшая работа над проектом предполагает объединение построенных тепловых сетей выше и ниже температуры пинча. В итоге получаем теплообменную сеть с 23-мя связями между потоками (рис. 4), т. е. на одно размещение меньше, чем у существующей сети. Общая площадь теплообмена составляет ~18100 м², т.е. на 7,7% больше существующей, но данный проект позволяет нагреть сырую нефть, поступающую на колонну К-1, до 245°C, т.е. снизить мощность трубчатой печи П₁ на 9 мВт, что экономически эквивалентно

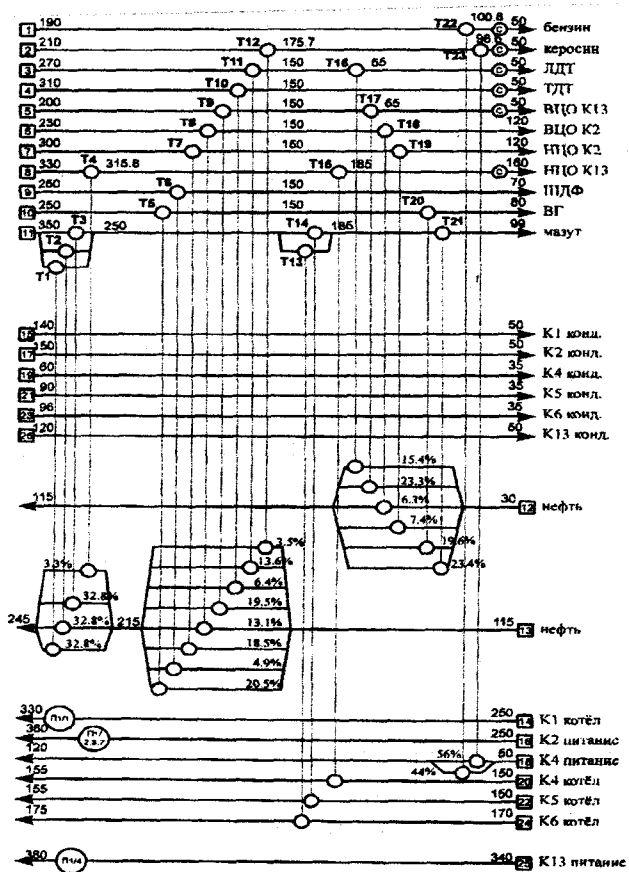


Рис. 4. Окончательный проект теплосети. На расщеплении потоков показаны процентные соотношения потоковых теплоемкостей

открытию новой нефтяной скважины. На несколько большую величину (~11МВт) снижается нагрузка на холодные энергоносители, т. к. некоторая часть энергии, ранее передававшаяся хладагентам, сейчас используется для дополнительного подогрева нефти.

Снижение нагрузки на хладагенты на 18% позволит уменьшить потребление технической воды от 0,47 м³ до 0,38 м³ на 1 тонну переработанной нефти, а это несколько улучшит экологическую обстановку, что очень важно для неблагоприятной в этом отношении Украины.

Авторы благодарят фонд Отделения науки и экологии НАТО (Грант НТЕGH.LG 941000) за оказанную финансовую поддержку.

Обозначения. C — удельная теплоемкость, Дж/м³ К; CP — потоковая теплоемкость, кВт/ К; H — потоковая энтальпия, кВт; Q_H — мощность, подводимая к процессу, Вт; Q_C — мощность, отводимая от процесса, Вт; Q_R — мощность рекуперации в теплообменной сети, Вт; T, T_s, T_T — температура текущая, начальная и конечная, К; M — массовый расход, кг/с; ВГ — вакуумный газойль; ВЦО — верхнее циркуляционное орошение; кон — конденсатор; кот — котел; К1 — предварительный эвапоратор нефти; К2 — основная ректификационная колонна; К3 — отпарная четырехсекционная колонна; К4 — стабилизационная колонна прямогонного бензина; К5 — ректификационная колонна для вторичной перегонки бензина с получением фракций 62 °С; К6 — ректификационная колонна для получения фракций 62–105 °С; К13 — колонна для вакуумной перегонки мазута; П — трубчатые печи; ЛТД — легкое дизельное топливо; НЦО — нижнее циркуляционное орошение; пит — питание; ТДТ — тяжелое дизельное топливо; ШДФ — широкая дизельная фракция; α_j — коэффициент теплоотдачи для j -го, Вт/м²К; ΔT_{\min} — минимальная разность температур между потоками на теплообменном оборудовании, К. **Индексы:** cold — относящийся к холодным потокам; hot — относящийся к горячим потокам; pinch — для величин, локализованных в точке пинча; S — относящийся к начальным температурам; T — относящийся к конечным температурам.

Список литературы: 1. Клемеш И., Птачник Р. Синтез оптимальной структуры систем теплообмена // ТОХТ. — 1987. — Т. 21, № 4. — С. 488 — 498. 2. Linnhoff B., Flower J. R. Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal network // AIChE J. — 1978. — Vol.24. — P. 633 — 642. 3. Linnhoff B., Vredevelde D. R. Pinch Technology has come of Age. // Chemical Engineering Progress. — July 1984. — P. 33 — 40. 4. Linnhoff B., Hindmarsh E. The pinch design method for heat exchanger networks // Chem. Engng. Sci. — 1983. — Vol.38, No. 5. — P. 745 — 763. 5. Linnhoff B. Pinch technology for the synthesis of optimal heat and power system/

- / Journal of Energy Resources technology. — 1989. — Vol. 3, No. 9. — P. 137—147. 6. Linnhoff B., Ahmad S. SUPERTAGETING: Optimum synthesis energy management system // ASME Journal of Energy Resource Technology. — 1989. — Vol. 111. — P. 121—130. 7. Linnhoff B., Townsend D.W. et al. User guide on process integration for the efficient use of energy. — IChemE, Rugby, UK, 1991 (New addition 1994). — P. 247 (P. 49 +247). 8. Linnhoff B., Ahmad S. Cost optimum heat exchanger networks — 1. Minimum energy and capital using simple model for capital cost // Computers and Chemical Engng. — 1990. — Vol. 14, No. 7. — P. 729—750.

Поступила в редакцию 07.05.97

Л. Л. Товажнянский, д-р техн. наук, П. А. Капустенко, канд. техн. наук, Е. И. Назорная, канд. техн. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ СМЕСЕЙ ПАРОВ В КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Расширение области применения высокоэффективных пластинчатых теплообменных аппаратов при конденсации многокомпонентных парогазовых смесей (процесс, широко распространенный в таких отраслях промышленности, как пищевая, химическая, фармацевтическая и нефтеперерабатывающая) потребовало более глубокого изучения процессов тепло-массопереноса в каналах сложной геометрии. Наличие в смеси нескольких компонентов значительно осложняет математическое моделирование указанных процессов в связи с возможностью одновременного проникания границы раздела пар-конденсат всеми паровыми компонентами.

При моделировании процесса переноса тепла в двухфазных потоках общепризнанным является представление общего термического сопротивления в виде суммы термических сопротивлений паровой фазы, пленки конденсата, теплопередающей стенки, загрязнений на ней и охлаждающей среды. Для многокомпонентных парогазовых смесей при конденсации существенную роль играют диффузионные процессы. Общее давление смеси, состоящей из нескольких компонентов, в направлении, нормальном к основному потоку, выравнивается. Следствием этого

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**ВЕСТНИК ХАРЬКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Выпуск 7

Часть 2. Механика. Машиностроение

Редактор *Л. Р. Моисеева*

Технический редактор *Л. Ф. Иванова*

Корректоры *Л. Ф. Иванова, Л. Р. Моисеева*

Подписано к печати 14.07.97 г. Формат 60x80/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5.86. Уч.-изд. л. 5.80. Тираж 150. Заказ 54-10.

Напечатано на ризографе ХГПУ
310002, Харьков, ул. Фрунзе, 21