



Синтез тепло- обменных сетей с учётом локаций теплоисточников, стоков и утилит

В процессе функционирования промышленных предприятий возникает множество локаций потребления тепловой и других видов (электрической, механической) энергий. При этом передача всех прочих требуемых видов энергии в масштабе предприятия не вызывает существенных финансовых затрат, поскольку электрическая энергия подводится по проводникам, имеющим относительно невысокое омическое сопротивление, а механическая энергия, как правило, обычно образуется в требуемом месте из какой-то другой формы (тепловой, электрической). Передача же тепловой энергии сопряжена с организацией и обслуживанием теплосетей, от рациональности проектирования которых зависят материальные затраты на их эксплуатацию. При проектировании тепловых сетей чаще рассматриваются вопросы трассировки потоков при заданных локациях теплоисточников и потребителей.

Синтез теплообменной сети на основе пинч-технологии связан с выбором локаций теплоисточников и потребителей из имеющегося массива данных. При этом учитывается ряд факторов, влияющих на выбор теплообменных связей: движущая

сила (разность температур теплоисточников и приёмников теплоты), площадь поверхностей теплообменных аппаратов и даже в отдельных случаях вместо абсолютной используется эксергетическая температура для учёта потерь от неравновесности теплообменных процессов [1].

Синтез теплообменной сети на основе пинч-технологии связан с выбором локаций теплоисточников и потребителей из имеющегося массива данных. При этом обязательно учитывается ряд факторов, влияющих на выбор теплообменных связей

Известно, что при расчёте общих тепловых потерь теплообменной сети определяются потери теплоты на один погонный метр длины трубопровода [2]. Это обстоятельство при назначении теплообменных связей в пинч-технологии не учитывается. Данная работа посвящена введению в пинч-технологии синтеза теплообменных сетей фактора локализации теплоисточников, потребителей и утилит.

Рецензия эксперта на статью получена 09.12.2021 [The expert review of the article received on December 9, 2021].

УДК 620.97. Научная специальность: 05.14.04.

Синтез теплообменных сетей с учётом локаций теплоисточников, стоков и утилит

Д. С. Агапов, к.т.н., доцент, кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис», [Санкт-Петербургский государственный аграрный университет \(СПбГАУ\)](#)

Для синтеза теплообменных сетей существует мощный инструмент, называемый пинч-технологией, позволяющий интегрировать технологические потоки теплоты и уже на этапе проектирования определить целевые показатели энергоэффективности системы. Однако при этом не учитывается удалённость (локализация) интегрируемых потоков, что приводит к игнорированию в расчёте потерь теплоты при её транспортировке. Частично данная проблема может быть решена рациональным разбиением всей системы на ряд подсистем, оптимизацию каждой из которых ведут отдельно. Данная работа направлена на совершенствование пинч-технологии за счёт включения в рассмотрение удалённости технологических источников и потребителей теплоты. Это позволит не разбивать систему на несколько, а рассматривать все необходимые технологические потоки.

Ключевые слова: пинч-технология, источники теплоты, потребители теплоты, теплообменные сети, интеграция тепловых процессов, энергоэффективность.

UDC 620.97. The number of scientific specialty: 05.14.04.

Synthesis of heat exchange networks taking into account the location of heat sources, drains and utilities

D. S. Agapov, PhD, Associate Professor, the "Cars, tractors and technical service" Department, [St. Petersburg State Agrarian University \(SPbGAU\)](#)

For the synthesis of heat exchange networks, there is a powerful tool called pinch technology that allows you to integrate technological heat flows and determine the energy efficiency targets of the system already at the design stage. However, the remoteness (localization) of the integrated flows is not taken into account, which leads to ignoring heat losses during its transportation in the calculation. Partially, this problem can be solved by rationally dividing the entire system into a number of subsystems, each of which is optimized separately. This work is aimed at improving pinch technology by including the remoteness of technological sources and consumers of heat in the consideration. This will allow you not to split the system into several, but to consider all the necessary technological flows.

Key words: pinch technology, heat sources, heat consumers, heat exchange networks, integration of thermal processes, energy efficiency.

Принцип пинч-технологии не позволяет учесть потери теплоты при транспортировке, просто вычтя их из теплоты источников, так как на этапе проектирования сети потери ещё неизвестны. Однако в процессе синтеза теплообменной сети при назначении теплообменной связи имеется возможность определять эти потери непосредственно для данного создаваемого потока. Назначение теплообменной связи производится для весьма ограниченного числа потоков локализованных на пинче, при этом предпочтение отдаётся связи с максимальной тепловой нагрузкой с целью минимизации количества теплообменников в сети [1, 2]. В данной работе предлагается при назначении связи в процессе синтеза теплообменной сети предприятия руководствоваться минимумом относительных потерь теплоты, определяемых соотношением $Q_{\text{п}}/Q_{\text{max}}$ для потоков, расположенных на пинче.

Потери теплоты $Q_{\text{п}}$ предлагается определять для стационарного режима цилиндрического n -слоистого трубопровода при граничных условиях третьего рода:

$$Q_{\text{п}} = \frac{\pi l (t - t_0)}{\frac{1}{\alpha_1 d_{\text{вн}}} + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{1}{2\lambda_i} \right) \ln \left(\frac{d_{i+1}}{d_i} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{нар}}}}, \quad (1)$$

где l — протяжённость теплообменной связи, которая определяется локализацией теплоисточников и потребителей, а также траекторией соединительного трубопровода, м; t — среднеинтегральная температура теплового агента, К; t_0 — температура окружающей среды, К; $d_{\text{вн}}$ и $d_{\text{нар}}$ — внутренний и наружный диаметры транспортирующего трубопровода, соответственно, м; α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи от агента к внутренней поверхности трубопровода и от наружной поверхности трубопровода окружающей среде, соответственно, Вт/(м²·К);



d_i и λ_i — диаметр [м] и коэффициент теплоотдачи [Вт/(м²·К)] i -го слоя трубопровода, соответственно.

Максимальное значение теплоты, передаваемого от горячего потока к холодному, определяется из выражения (2), предложенного в работе [3]:

$$Q = \begin{cases} \min(Q'_r; Q'_x), \min(Q'_r; Q'_x) \geq 0, \\ 0, \min(Q'_r; Q'_x) < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

здесь Q'_r — наибольшая теплота, которую сможет отдать горячий поток в условиях температурных ограничений; Q'_x — наибольшая теплота, которую сможет воспринять холодный поток в условиях температурных ограничений:

$$Q'_r = c_{p,r} \{ T'_{r,n} - \min[\max(T'_{x,n}; T'_{r,k}); T'_{r,n}] \}, \quad (3)$$

$$Q'_x = c_{p,x} \{ \max[\min(T'_{x,k}; T'_{r,n}); T'_{x,n}] - T'_{x,n} \}, \quad (4)$$

где $c_{p,x}$ и $c_{p,r}$ — потоковые теплоёмкости холодного и горячего теплоисточников, соответственно, Вт/К; $T'_{x,n}$ и $T'_{x,k}$ — «сдвинутые» начальная и конечная температуры холодного потока, соответственно, К; $T'_{r,n}$ и $T'_{r,k}$ — «сдвинутые» начальная и конечная температуры горячего потока, соответственно, К.

Сдвиг температур горячих и холодных потоков заложен в пинч-технологии для обеспечения заданной величины температурного напора ΔT .

При этом, как правило, температуры холодного потока поднимают на величину $\Delta T/2$, а температуры горячего потока опускают на величину $\Delta T/2$ [1].

В этом случае формулы для сдвигания представятся в следующем виде:

$$\begin{aligned} T'_{r,n} &= T_{r,n} - \frac{\Delta T}{2}; \quad T'_{r,k} = T_{r,k} - \frac{\Delta T}{2}; \\ T'_{x,n} &= T_{x,n} + \frac{\Delta T}{2}; \quad T'_{x,k} = T_{x,k} + \frac{\Delta T}{2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $T_{r,n}$ и $T_{r,k}$ — начальная и конечная температуры горячего потока, соответственно, К; $T_{x,n}$ и $T_{x,k}$ — начальная и конечная температуры холодного потока, соответственно, К.

Таким образом, при проектировании теплообменной сети необходимо вести синтез теплообменных связей с обеспечением минимальных относительных потерь $Q_{\text{п}}/Q_{\text{max}}$. Это приведёт к снижению капитальных затрат и обеспечит синтез теплообменной сети с минимальными тепловыми потерями.

Вывод

Решена проблема учёта влияния локализации тепловых потоков на структуру теплообменной сети путём введения в пинч-технологии оптимизационного критерия относительных тепловых потерь. Предложен способ определения этого критерия на основе фундаментальных законов теплообмена. ●

1. Основы интеграции тепловых процессов: монография / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. Товажнянский и др. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. 458 с.
2. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. — М.: Высшая школа, 1975. 496 с.
3. Картошкин А.П., Агапов Д.С. Ресурсосбережение при проектировании и эксплуатации технологического оборудования энергетических систем: монография. — СПб.: Проспект науки, 2021. 312 с.

References — see page 79.



Synthesis of heat exchange networks taking into account the location of heat sources, drains and utilities. Pp. 36–37.

Dmitry S. Agapov, PhD, Associate Professor, the “Cars, tractors and technical service” Department, [Saint-Petersburg State Agrarian University \(SPbGAU\)](#)

1. R. Smit, J. Klemesh, L.L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapustenko, L.M. Ul'ev. *Osnovy integracii teplovyh processov: monografija* [Fundamentals of the integration of thermal processes: A monograph]. Kharkov, Ukraine. NTU “HPI” [National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”]. 2000. 458 p. [In Russian]
2. V.V. Nashhokin. *Tekhnicheskaja termodinamika i teploperedacha* [Technical thermodynamics and heat transfer]. Moscow. Vysshaja shkola [“Higher education” Publishing House]. 1975. 496 p. [In Russian]
3. A.P. Kartoshkin, D.S. Agapov. *Resursosberezhenie pri proektirovanii i jekspluatacii tehnologicheskogo oborudovanija jenergeticheskikh sistem: monografija* [Resource saving in the design and operation of technological equipment of energy systems: A monograph]. St. Petersburg. “Prospekt nauki” [“Prospect of Science” Publishers]. 2021. 310 p. [In Russian]