

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 66.045

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-5-115-125

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПИНЧ-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЁТОМ ИХ ЛОКАЛИЗАЦИИ

Агапов ¹Д.С., Картошкин ¹А.П., Калютник ²А.А., Кондрашов ²А.В.

¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Пушкин, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

different76@list.ru¹

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Проектирование сети теплообменных аппаратов для регенерации теплоты и интеграции тепловых процессов в целом является весьма актуальной задачей энергосбережения. Такой мощный и широко применяемый инструмент для синтеза и дизайна сети теплообменных аппаратов как пинч-технология обладает рядом ограничений. Настоящее исследование направлено на расширение возможностей пинч-технологии. Пинч-технология способна эффективно работать только со стационарными потоками теплоты. В практике встречаются циклические и периодические процессы, что ограничивает возможности применения пинч-технологии. Это и явилось причиной настоящего исследования с целью расширения границ применения пинч-технологии. **ЦЕЛЬ.** Совершенствование метода пинч-технологии для расширения возможностей интеграции циклических и периодических тепловых процессов, а также учёта их локализации. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи произведён анализ принципа определения теплообменных связей, предложены алгоритмы их выбора и синтезированы новые критерии оптимизации. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложен критерий структурного совершенства системы, являющийся отношением регенерируемой в системе теплоты к её теоретически возможному значению. Теоретическими результатами являются предложенные критерий структурного совершенства и обобщённый показатель структурно-параметрического совершенства системы. Практическим результатом исследования явилось предложенное техническое устройство для преобразования нестационарного потока в ряд стационарных потоков. Предложенное устройство преобразования расширяет возможности пинч-технологии, а введённые критерии позволяют вести синтез или дизайн системы, опираясь на новые целевые показатели, такие как степень интеграции тепловых потоков. Также практическим результатом данного научного исследования является программа для синтеза теплообменных сетей. Созданная в процессе работы программа позволяет вести синтез теплообменной сети в автоматическом и полуавтоматическом режимах. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Благодаря проведённым исследованиям удалось усовершенствовать такой мощный инструмент как пинч-технология и существенно расширить его возможности. Предложено совершенствование пинч-технологии для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов и учёта их локализации. Для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов предложено техническое устройство, позволяющее преобразовать нестационарный поток на несколько стационарных, а для учёта локализации тепловых потоков предложен программный продукт, позволяющий вести синтез теплообменной сети в автоматическом и полуавтоматическом режимах. Кроме того, введены два показателя, характеризующие структурное и структурно-параметрическое совершенство системы.

Ключевые слова: Пинч-технология; интеграция тепловых процессов; теплота; критерий структурного совершенства; теплообменный аппарат.

Для цитирования: Агапов Д.С., Картошкин А.П., Калютик А.А., Кондрашов А.В. Совершенствование пинч-технологии для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов с учётом их локализации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 115 – 125. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-115 – 125.

IMPROVEMENT OF PINCH TECHNOLOGY FOR THE POSSIBILITY OF INTEGRATION OF NON-STATIONARY THERMAL PROCESSES, TAKEN INTO ACCOUNT OF THEIR LOCALIZATION

Agapov ¹D.S., Kartoshkin ¹A.P., Kalutik ²A.A. Kondrashov² A.G.

¹St. Petersburg State Agrarian University, Pushkin, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

different76@list.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Designing a network of heat exchangers for heat recovery and integration of thermal processes in general is a very urgent task of energy saving. Such a powerful and widely used tool for the synthesis and design of a network of heat exchangers as pinch technology has a number of limitations, and this study is aimed at expanding its capabilities. Pinch technology can only work effectively with stationary heat flows. In practice, cyclic and periodic processes are encountered, which limits the possibilities of using pinch technology. This was the reason for this study with the aim of expanding the boundaries of application of pinch technology. *THE PURPOSE.* Improving the pinch technology method to expand the possibilities for integrating cyclic and periodic thermal processes, as well as taking into account their localization. *METHODS.* When solving the problem, the principle of determining heat exchange connections was analyzed, other algorithms for their selection were proposed, and new optimization criteria were synthesized. *RESULTS.* A criterion for the structural perfection of a system is proposed, which is the ratio of the heat regenerated in the system to its theoretically possible value. The theoretical results are the proposed criterion of structural perfection and a generalized indicator of the structural-parametric perfection of the system. The practical result of the study was the proposed technical device for converting an unsteady flow into a series of stationary flows. Also, the practical result of this scientific research is a program for the synthesis of heat exchange networks. The proposed conversion device expands the capabilities of pinch technology, and the introduced criteria will make it possible to synthesize or design a system based on new target indicators. The program created during the work allows for the synthesis of a heat exchange network in automatic and semi-automatic modes. *CONCLUSION.* Thanks to the research carried out, it was possible to improve such a powerful tool as pinch technology and significantly expand its capabilities. An improvement of pinch technology has been proposed to enable the integration of non-stationary thermal processes and take into account their localization. To enable the integration of non-stationary thermal processes, a technical device has been proposed that allows converting a non-stationary flow into several stationary ones, and to take into account the localization of heat flows, a software product has been proposed that allows for the synthesis of a heat exchange network in automatic and semi-automatic modes. In addition, two indicators have been introduced that characterize the structural and structural-parametric perfection of the system.

Keywords: Pinch technology; integration of thermal processes; heat; criterion of structural perfection; heat exchanger.

For citation: Agapov D.S., Kartoshkin A.P., Kalutik A.A. Kondrashov A.G. Improvement of pinch technology for the possibility of integration of non-stationary thermal processes, taken into account of their localization. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5): 115-125. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-115-125.

Введение (Introduction)

Эффективность функционирования технических систем (механических,

гидравлических, тепловых и других) зависит от их совершенства, характеризующегося определёнными целевыми показателями, например, КПД, на которые в свою очередь влияют как структура самой системы, так и её рабочие параметры [1].

Применительно к теплоэнергетическим системам параметрическое совершенство характеризуется эксергетическим КПД, как для отдельных элементов, так и системы в целом. В работе [2] предложена связь между эксергетическим КПД технологического элемента и эксергетическим КПД сложной тепловой схемы.

Задаваясь относительно незначительным изменением регулировочных параметров системы и фиксируя её отклик, возможно отыскание оптимума целевого параметра, коим является суммарная эксергия всех энергетических потоков на выходе или производство энтропии. При этом также возможно определение вклада отдельного элемента системы в общую её эффективность.

Однако отыскание, таким образом, оптимальных рабочих (режимных) параметров системы производится только в пределах одного структурного решения и не преодолевает качественный барьер изменения структуры. Следовательно, первым этапом термодинамического совершенствования системы должен выступать её структурный синтез.

В целом структурный синтез — трудно формализуемый этап, включающий в себя анализ и организацию элементов, обеспечивающую оптимальную структуру или конструкцию системы. Как правило, это дискретное множество структурных решений, выбор которых осуществляется известными методами линейного, нелинейного и дискретного программирования. Для систем малой размерности (до 10 тепловых потоков) вполне пригодны методы линейного и нелинейного программирования, в то время как увеличение количества тепловых потоков приводит к многократному повышению размерности решаемой задачи. В этом случае более эффективными становятся методы поиска решений, основанные на эвристических алгоритмах. Впервые такая задача для синтеза сети теплообменных аппаратов была предложена и решена на основе одной из фундаментальных задач комбинаторной оптимизации в области математической оптимизации или исследовании операций, так называемой «задачи о назначениях», которая состоит в поиске минимальной суммы дуг во взвешенном двудольном графе. Первыми исследователями были Kesler M., Parker R., Kobayashi S., Umeda T., Ichikawa A. Позднее исследования продолжили Jezowski, J., Klemes J., Kravanja Z., Grossmann I., и другие. Позднее профессор Linnhoff, B., предложил пинч-технологии для синтеза теплообменных сетей [4, 5], которая в последствии легла в основу некоторых программных продуктов, таких как *Aspen HYSYS* и др. [6]. Основу пинч-технологии составляет как метод определения целевых показателей системы, так и эвристический способ выбора теплообменных связей с определением их мощности.

Несмотря на то, что пинч-технология представляет собой весьма мощный и успешно применяемый в различных промышленных отраслях инструмент для структурного синтеза не только теплосистем, но и водных коммуникаций, она имеет ряд ограничений. Так, например, все тепловые потоки, которыми она оперирует, являются стационарными, что затрудняет использование циклических и периодических процессов. Кроме того, не учитывается локализация источников теплоты, а значит, их удалённость не влияет на выбор теплообменных связей. Такие трудности практического характера преодолеваются усреднением параметров и декомпозицией системы [7], что теоретически не всегда приводит к оптимальному решению. Очевидно, что снятие этих ограничений позволит существенно расширить поисковую область и получить лучшие решения.

Целью настоящего исследования является совершенствование метода пинч-технологии для расширения возможностей интеграции циклических и периодических тепловых процессов, а также учёта их локализации.

Научная значимость исследования состоит в определении степени интеграции тепловых потоков и обобщенного показателя оценки термодинамического совершенства систем теплотехнического и технологического оборудования.

Практическую значимость исследования представляют средство для интеграции нестационарных тепловых потоков (патент на полезную модель №157238/27.) и программный код для автоматизированного проектирования сети теплообменников, позволяющий учитывать экспертные рекомендации (свидетельство № 2015612919) и локализацию источников теплоты.

Важным достоинством пинч-технологии является то, что её можно применять как на этапе проектирования производства, так и при реконструкции действующего предприятия. Практическое применение пинч-технологии по различным источникам [8]

позволяет снизить затраты на потребляемую энергию в среднем на 30-40% [9]. Опыт авторов [3] показывает, что для современных производств этот показатель составляет 10–15%, а для производств до 1990-го года может достигать 40-50%. Следует отметить, что это достигается только за счёт интеграции тепловых процессов. К настоящему времени пинч-технология широко применяется в различных отраслях: в пищевой промышленности [10], в энергетике [11], в коммунальном хозяйстве [12], водоснабжении [13] и других [14]. Однако в рамках одного структурного решения существуют возможности параметрической оптимизации, позволяющие достичь значительных результатов ресурсосбережения [13].

Материалы и методы (Materials and methods)

Для синтеза структурного решения по пинч-технологии необходимо произвести экстракцию данных о тепловых потоках рассматриваемой системы (предприятия). Такими данными являются начальные и конечные температуры потоков, а также их мощность или потоковая теплоёмкость (произведение удельной теплоёмкости на массовый расход). При этом потоки, у которых начальная температура больше конечной называются горячими, а у которых наоборот — холодными. Выработка оптимального структурного решения как раз и основывается на нахождении теплообменных связей между горячими и холодными потоками. Таким образом, составляются матрицы горячих (1) и холодных (2) потоков.

$$H = \begin{vmatrix} T_{г,н,1} & T_{г,к,1} & C_{p,г,1} \\ T_{г,н,2} & T_{г,к,2} & C_{p,г,2} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_{г,н,i} & T_{г,к,i} & C_{p,г,i} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_{г,н,n-1} & T_{г,к,n-1} & C_{p,г,n-1} \\ T_{г,н,n} & T_{г,к,n} & C_{p,г,n} \end{vmatrix} \quad (1)$$

$$C = \begin{vmatrix} T_{х,н,1} & T_{х,к,1} & C_{p,х,1} \\ T_{х,н,2} & T_{х,к,2} & C_{p,х,2} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_{х,н,i} & T_{х,к,i} & C_{p,х,i} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_{х,н,n-1} & T_{х,к,n-1} & C_{p,х,n-1} \\ T_{х,н,n} & T_{х,к,n} & C_{p,х,n} \end{vmatrix} \quad (2)$$

На основании матриц горячих H и холодных C потоков составляется базис температур (3), включающий все температуры горячих и холодных потоков.

$$T_{H \cup C} = \begin{vmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_j \\ \dots \\ T_{k-1} \\ T_k \end{vmatrix} \quad (3)$$

В случае стационарных потоков такая операция не вызывает затруднений, так как все температуры потоков имеют дискретное значение. Однако в случае нестационарных потоков такая операция практически невозможна, так как требует бесконечно большого числа температурных значений в базисе (3). Примером такого потока могут служить циклические и периодические процессы. Рассмотрим наиболее общий случай (нестационарный поток) с переменной по времени τ температурой T , рисунок 1.

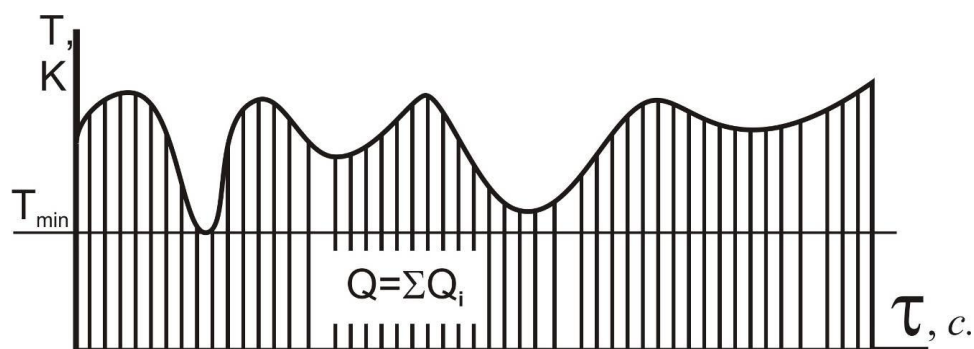


Рис. 1. Зависимость температуры от времени для нестационарного теплового потока

Fig. 1. Dependence of temperature on time for unsteady heat flow

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для возможности для интеграции такого потока было предложено и запатентовано техническое устройство (свидетельство о государственной регистрации полезной модели «Теплообменный аппарат» № 157238 от 12 января 2015 года) рисунок 2.

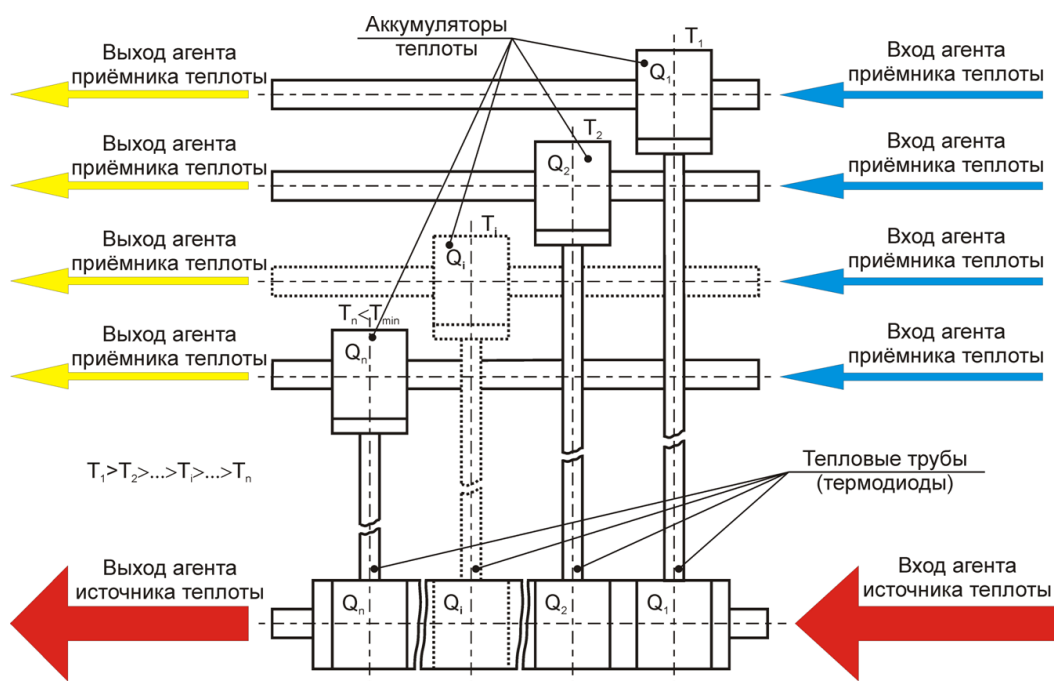


Рис. 2. Теплообменный аппарат, преобразующий нестационарный поток в несколько стационарных

Fig. 2. A heat exchanger that converts an unsteady flow into several stationary ones

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В нём нестационарный поток последовательно проходит ряд теплообменников, которые через тепловые трубы сообщаются с тепловыми аккумуляторами фазового перехода с различными температурами плавления теплоаккумулирующего материала. От тепловых аккумуляторов фазового перехода отбирается теплота при постоянной температуре – температуре плавления теплоаккумулирующего материала. Модели тепловых процессов в накопителях энергии для обоснования проектных решений рассмотрены в работах профессора Куколева М.И. [15] других исследователей [14].

Таким образом, нестационарный поток разбивается на несколько стационарных, рисунок 3. Сведения о таких потоках могут быть внесены в матрицы (1) и (2) и разложены по базису температур (3).

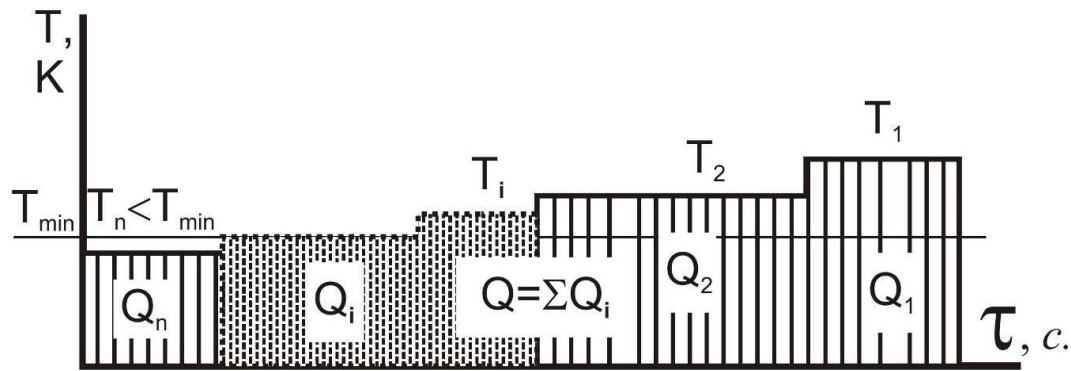


Рис. 3. Стационарные тепловые потоки на выходе из устройства преобразования

Fig. 3. Stationary heat flows at the outlet of the conversion device

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для дальнейшего структурного синтеза системы необходимо определить максимальную мощность теплообменных связей между каждым «горячим» и «холодным» источником теплоты. В общем случае схематичное изображение горячих и холодных потоков может быть представлено на рисунке 4. На рисунке 4 красным цветом представлены горячие потоки, а синим – холодные. Ширина прямоугольников выражает потоковую теплоёмкость (мощность) потока, а верхние и нижние основания прямоугольников соответствуют температурным границам потока.

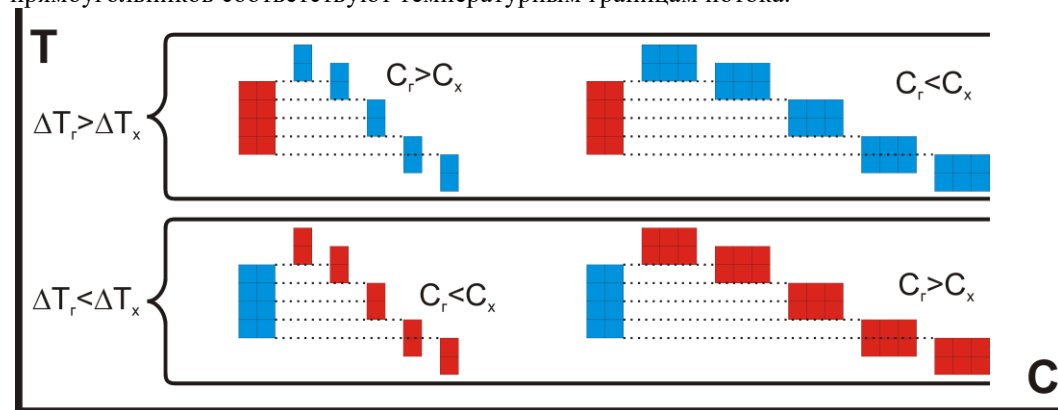


Рис. 4. Возможные варианты соотношений горячих и холодных потоков.

Fig. 4. Possible options for the ratio of hot and cold flows.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для этого предложена формула 4

$$Q = \begin{cases} \min(Q'_r; Q'_x), \min(Q'_r; Q'_x) \geq 0 \\ 0, \min(Q'_r; Q'_x) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

где Q'_r — наибольшая теплота, которую сможет отдать горячий поток холодному потоку, определяется по выражению (5); Q'_x — наибольшая теплота, которую сможет воспринять холодный поток от горячего потока, определяется по выражению (6).

$$Q'_r = c_{p,r} \cdot (T'_{r,n} - \min(\max(T'_{x,k}; T'_{r,k}); T'_{r,n})) \quad (5)$$

$$Q'_x = c_{p,x} \cdot (\max(\min(T'_{x,k}; T'_{r,n}); T'_{x,n}) - T'_{x,n}) \quad (6)$$

где $T'_{r,n}$ — сдвинутая начальная температура горячего потока, К, определяется по выражению (7); $T'_{r,k}$ — сдвинутая конечная температура горячего потока, К, определяется по выражению (8); $T'_{x,n}$ — сдвинутая начальная температура холодного потока, К, определяется по выражению (9); $T'_{x,k}$ — сдвинутая конечная температура холодного потока, К, определяется по выражению (10).

$$T'_{r,n} = T_{r,n} - \Delta T/2 \quad (7)$$

$$T'_{r,k} = T_{r,k} - \Delta T/2 \quad (8)$$

$$T'_{x,n} = T_{x,n} + \Delta T/2 \quad (9)$$

$$T'_{x,k} = T_{x,k} + \Delta T/2 \quad (10)$$

где $T_{r,n}$ — начальная температура горячего потока, К; $T_{r,k}$ — конечная температура горячего потока, К; $T_{x,n}$ — начальная температура холодного потока, К; $T_{x,k}$ —

конечная температура холодного потока, К.

Сдвигание температур на величину $\Delta T/2$ необходимо для обеспечения в точке пинча заданного значения ΔT и работоспособности теплообменных аппаратов в этой точке.

Определённое таким образом значение Q представляет собой максимальное значение теплоты, которое может быть передано от горячего источника к холодному. При этом теплота может передаваться не от всего «горячего» потока, а только от его части, или подводиться не ко всему «холодному» потоку, а только к части его. При этом потоки разделяются, и возникают ещё, как минимум, три возможных варианта интеграции двух потоков: последовательная, параллельная и парапараллельная.

Последовательный способ заключается в том, что каждый поток (и горячий и холодный) вступают в интеграцию при своих теплоёмкостях. Параллельная интеграция заключается в том, что каждый поток, как горячий, так и холодный, делится в свою очередь на два параллельных потока. Полученные таким делением потоки имеют те же самые значения начальных и конечных температур, что и у начального потока, из которого они получились. Однако теплоёмкость каждого из них будет меньше, чем у начального потока. Суммарная же теплоёмкость двух потоков, полученных делением, будет равна теплоёмкости потока, из которого они получились. В интеграцию вступают только одна часть горячего потока и одна часть холодного потока. При этом теплоёмкости потоков, вступающих в интеграцию, подбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальную теплоту интеграции между ними. При этом часто бывает так, что теплота одного из оставшихся потоков, которые не пошли на интеграцию, равна нулю. Как правило, такой способ интеграции всегда имеет значение возможной теплоты интеграции больше нуля. Парапараллельная интеграция аналогична параллельной интеграции, но с тем отличием, что потоки, вступающие в интеграцию, имеют равные теплоёмкости. Значение этих теплоёмкостей равны значению наименьшей из теплоёмкостей потоков, из которых они образованы. Подробнее эти способы интеграции и программные алгоритмы их реализующие рассмотрены в источниках [1, 3].

Как следует из формул (4 ... 10), определённая таким образом теплота интеграции не зависит от локализации источников теплоты, а определяется только их потоковой теплоёмкостью, а также начальными и конечными температурами источников. Однако при транспортировке и передаче теплоты неизбежно возникнут потери, которые будут тем больше, чем выше будет разность температур между источниками и дальше расстояние транспортировки. Программный продукт [6], реализующий возможность учитывать потери теплоты при транспортировке, путём процентного снижения мощности горячих источников позволяет вести синтез теплообменной сети в ручном, автоматическом и полуавтоматическом режиме.

Для оценки совершенства структурного синтеза вводятся понятия степени интеграции тепловых процессов и критерий термодинамического совершенства технической системы.

Степень интеграции тепловых процессов χ - это отношение теплоты интеграции к её максимально возможному значению для данной технической системы, то есть при $\Delta T=0$. Для существующих систем степень интеграции определяется по формуле (11), а для вновь проектируемых систем по формуле (12).

$$\chi = \frac{Q_{P(\Delta T_{\text{пинч}})}}{Q_{P(\Delta T_{\text{пинч}}=0)}} \quad (11)$$

$$\chi = \frac{\left| \sum_{i=1}^{i=m} h \right| - \left| \sum_{i=1}^{i=n} c \right| - |Q_{\Pi}| - |Q_o|}{2 \cdot Q_{P(\Delta T_{\text{пинч}}=0)}} \quad (12)$$

где Q_p — теплота регенерации, $\sum h$ и $\sum c$ — соответственно суммы теплот горячих и холодных потоков, Q_{Π} и Q_o — соответственно теплоты горячих и холодных утилит.

Очевидно, что в теории показатель степени интеграции тепловых процессов χ может варьироваться от нулевого значения до единицы, хотя на практике значение единицы недостижимо, так как теплообменные аппараты не могут работать с нулевой разностью температур. Тем не менее, следует отметить, что на практике возможно достижение весьма высокого значения этого показателя (порядка 90-95% и выше).

В процессе выполнения данного исследования возникла необходимость уточнения таких понятий как: «интеграция» «регенерация» и «утилизация» теплоты. Под

регенерацией следует понимать вторичное использование теплоты в том же производственном цикле. Утилизацией теплоты является дальнейшее использование отводимой в производственном цикле теплоты для непроеизводственных нужд. Понятие «интеграция теплоты» это создание теплообменных связей как внутри рассматриваемой системы, так и с внешними источниками теплоты. Таким образом, это более широкое понятие и включает в себя два предыдущих, регенерацию и утилизацию теплоты [16].

Как было сказано выше, в рамках одного структурного решения существуют возможности параметрической оптимизации, позволяющие достичь значительных результатов ресурсосбережения. Степень интеграции тепловых процессов характеризует лишь структурное совершенство системы. Совершенство протекания термодинамических процессов в системе характеризуется её эксергетическим КПД η_{ex} [17]. Таким образом, возникает необходимость разработки обобщенного показателя η оценки термодинамического совершенства системы, включающей в себя оба показателя, как структурного χ , так и параметрического совершенства η_{ex} . В качестве такой зависимости предлагается использовать формулу (13).

$$\eta = \eta_{ex} + (1 - \eta_{ex}) \cdot \eta_{ex} \cdot \chi \quad (13)$$

Результаты (Results)

Пинч-технология является весьма мощным инструментом для проектирования новых и модернизации существующих предприятий. Несмотря на то, что она была предложена в химической технологии для дизайна теплообменных сетей, она нашла применение в энергетике и даже в водоснабжении и водоотведении. Тем не менее, она способна работать только со стационарными потоками теплоты. На практике нередко встречаются циклические и периодические процессы, что ограничивает возможности применения пинч-технологии. Это и явилось причиной настоящего исследования с целью расширения границ применения пинч-технологии. Практическая реализация такого расширения осуществляется на основе предложенного технического устройства, позволяющего преобразовать нестационарный поток на несколько стационарных.

Также на основе пинч-метода предложен критерий структурного совершенства системы, являющийся отношением регенерируемой в системе теплоты к её теоретически возможному значению.

Обсуждение (Discussions)

Благодаря проведённым исследованиям удалось усовершенствовать такой мощный инструмент как пинч-технология и существенно расширить его возможности.

Теоретическими результатами являются предложенные критерий структурного совершенства и обобщённый показатель структурно-параметрического совершенства системы.

Практическим результатом исследования явилось предложенное техническое устройство для преобразования нестационарного потока в ряд стационарных потоков. Также практическим результатом данного научного исследования является программа для синтеза теплообменных сетей.

Предложенное устройство преобразования расширяет возможности пинч-технологии, а введённые критерии позволят вести синтез или дизайн системы, опираясь на новые целевые показатели. Созданная в процессе работы программа позволяет вести синтез теплообменной сети в автоматическом и полуавтоматическом режимах.

Заключение (Conclusions)

В данной работе предложено совершенствование пинч-технологии для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов и учёта их локализации. Для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов предложено техническое устройство, позволяющее преобразовать нестационарный поток на несколько стационарных, а для учёта локализации тепловых потоков предложен программный продукт, позволяющий вести синтез теплообменной сети в автоматическом и полуавтоматическом режимах.

Кроме того, введены два показателя, характеризующие структурное и структурно-параметрическое совершенство системы.

Литература

1. Агапов, Д. С. Структурная и параметрическая оптимизация систем промышленного теплотехнического и технологического оборудования: специальность 05.14.04 "Промышленная теплоэнергетика": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Агапов Дмитрий Станиславович. – Санкт-Петербург, 2016. – 22 с.
2. Луканин, П. В. Энергосберегающие технологии на предприятиях целлюлозно-бумажной

промышленности: специальность 05.14.04 "Промышленная теплоэнергетика": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Луканин Павел Владимирович, 2022. – 357 с. – EDN AJSODJ.

3. Картошкин, А. П. Ресурсосбережение при проектировании и эксплуатации технологического оборудования энергетических систем / А. П. Картошкин, Д. С. Агапов. – Санкт-Петербург: Проспект Науки, 2021. – 311 с. – ISBN 978-5-6046442-1-8.

4. AIChE Journal Vol 24, Issue 4, July 1978, Pages: 633–642, Bodo Linnhoff and John R. Flower "Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks"

5. Linnhoff, Bodo; Sahdev, Vimal (2000). "Pinch Technology". *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. doi:10.1002/14356007.b03_13. ISBN 3527306730.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612919 Российская Федерация. Пинч анализ и теплообменная сеть: № 2014663873: заявл. 29.12.2014: опубл. 26.02.2015 / Д. С. Агапов.

7. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л. Основы интеграции тепловых процессов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2000. – 458 с.

8. Dhole V.R., Smith R., Linnhoff B. Computer Application for Energy – Efficient System / Paper in Encyclopedia of Energy Technology and the Environment. 4Volume. Set.: New York. John Wiley and Sons. Inc. – 1995. pp. 935 – 960.

9. Sustainable energy development in the major power-generating countries of the European Union: The Pinch Analysis / W. Su, Y. Ye, C. Zhang [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 256. – P. 120696. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.120696.

10. Optimal configuration and economic analysis of PRO-retrofitted industrial networks for sustainable energy production and material recovery considering uncertainties: Bioethanol and sugar mill case study / U. Safder, J. Y. Lim, P. Ifaei [et al.] // Renewable Energy. – 2022. – Vol. 182. – P. 797-816. – DOI 10.1016/j.renene.2021.10.047.

11. Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration / F. Schlosser, J. Vogelsang, J. Hesselbach [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 133. – P. 110219. – DOI 10.1016/j.rser.2020.110219.

12. Development of an integrated network for waste-to-energy and central utility systems considering air pollutant emissions pinch analysis / S. Hwangbo, G. Sin, G. Rhee, C. K. Yoo // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 252. – P. 119746. – DOI 10.1016/j.jclepro.2019.119746.

13. Design of optimal heat exchanger network with fluctuation probability using break-even analysis / A. M. Hafizan, S. R. Wan Alwi, Z. A. Manan [et al.] // Energy. – 2020. – Vol. 212. – P. 118583. – DOI 10.1016/j.energy.2020.118583.

14. Electric System Cascade Extended Analysis for optimal sizing of an autonomous hybrid CSP/PV/wind system with Battery Energy Storage System and thermal energy storage / M. Chennaif, H. Zahboune, M. Elhafyani, S. Zouggar // Energy. – 2021. – Vol. 227. – P. 120444. – DOI 10.1016/j.energy.2021.120444.

15. Куколев, М. И. Модели тепловых процессов в накопителях энергии для обоснования проектных решений: специальность 05.14.04 "Промышленная теплоэнергетика": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Куколев Максим Игоревич. – Санкт-Петербург, 2006. – 280 с.

16. Агапов, Д. С. Регенерация, утилизация и интеграция теплоты / Д. С. Агапов // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2022. – № 2(242). – С. 25.

17. Exergoeconomic performance comparison, selection and integration of industrial heat pumps for low grade waste heat recovery / M. Wang, C. Deng, Y. Wang, X. Feng // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 207. – P. 112532. – DOI 10.1016/j.enconman.2020.112532.

Авторы публикации

Агапов Дмитрий Станиславович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис» (АТТС) Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (СПбГАУ). Email: different76@list.ru.

Картошкин Александр Петрович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис» (АТТС) Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (СПбГАУ). Email: akartoshkin@yandex.ru.

Калютик Александр Антонович – канд. техн. наук, доцент, директор высшей школы атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ). Orcid ID 0000-0002-2965-357X Email: aa_kalyutik@spbstu.ru.

Кондрашов Алексей Владимирович – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ). Email: kondrashov22@gmail.com

References

1. Agapov, D.S. Structural and parametric optimization of systems of industrial heating and technological equipment: specialty 05.14.04 "Industrial Heat and Power Engineering": abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Agapov Dmitry Stanislavovich. – St. Petersburg, 2016. – 22 p.
2. Lukanin, P.V. Energy-saving technologies at pulp and paper industry enterprises: specialty 05.14.04 "Industrial Heat and Power Engineering": dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Lukanin Pavel Vladimirovich, 2022. – 357 p.
3. Kartoshkin, A.P. Resource saving in the design and operation of technological equipment of energy systems / A.P. Kartoshkin, D.S. Agapov. – St. Petersburg: Prospekt Nauki, 2021. – 311 p. – ISBN 978-5-6046442-1-8.
4. AIChE Journal Vol 24, Issue 4, July 1978, Pages: 633–642, Bodo Linnhoff and John R. Flower "Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks"
5. Linnhoff, Bodo; Sahdev, Vimal (2000). "Pinch Technology". *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. doi:10.1002/14356007.b03_13. ISBN 3527306730.
6. Certificate of state registration of a computer program No. 2015612919 Russian Federation. Pinch analysis and heat exchange network: No. 2014663873: application. 12/29/2014: publ. 02/26/2015 / D. S. Agapov.
7. Smith R., Klemesh J., Tovazhnyansky L.L. Basics of thermal process integration. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2000. – 458 p. Smith R., Klemesh J., Tovazhnyansky L.L. Basics of thermal process integration. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2000. – 458 p.
8. Dhole V.R., Smith R., Linnhoff B. Computer Application for Energy – Efficient System / Paper in Encyclopedia of Energy Technology and the Environment. 4Volume. Set.: New York. John Wiley and Sons. Inc. – 1995. pp. 935 – 960.
9. Sustainable energy development in the major power-generating countries of the European Union: The Pinch Analysis / W. Su, Y. Ye, C. Zhang [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 256. – P. 120696. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.120696.
10. Optimal configuration and economic analysis of PRO-retrofitted industrial networks for sustainable energy production and material recovery considering uncertainties: Bioethanol and sugar mill case study / U. Sadfer, J. Y. Lim, P. Ifaei [et al.] // Renewable Energy. – 2022. – Vol. 182. – P. 797-816. – DOI 10.1016/j.renene.2021.10.047.
11. Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration / F. Schlosser, J. Vogelsang, J. Hesselbach [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 133. – P. 110219. – DOI 10.1016/j.rser.2020.110219.
12. Development of an integrated network for waste-to-energy and central utility systems considering air pollutant emissions pinch analysis / S. Hwangbo, G. Sin, G. Rhee, C. K. Yoo // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 252. – P. 119746. – DOI 10.1016/j.jclepro.2019.119746.
13. Design of optimal heat exchanger network with fluctuation probability using break-even analysis / A. M. Hafizan, S. R. Wan Alwi, Z. A. Manan [et al.] // Energy. – 2020. – Vol. 212. – P. 118583. – DOI 10.1016/j.energy.2020.118583.
14. Electric System Cascade Extended Analysis for optimal sizing of an autonomous hybrid CSP/PV/wind system with Battery Energy Storage System and thermal energy storage / M. Chennaif, H. Zahboune, M. Elhafyani, S. Zouggar // Energy. – 2021. – Vol. 227. – P. 120444. – DOI 10.1016/j.energy.2021.120444.
15. Kukolev, M. I. Models of thermal processes in energy storage devices to substantiate design decisions: specialty 05.14.04 "Industrial Thermal Power Engineering": dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Kukolev Maxim Igorevich. – St. Petersburg, 2006. – 280 p.
16. Agapov, D. S. Regeneration, utilization and integration of heat / D. S. Agapov // Plumbing, Heating, Air Conditioning. – 2022. – No. 2(242). – P. 25.
17. Exergoeconomic performance comparison, selection and integration of industrial heat pumps for low grade waste heat recovery / M. Wang, C. Deng, Y. Wang, X. Feng // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 207. – P. 112532. – DOI 10.1016/j.enconman.2020.112532.

Authors of the publication

Dmitry S. Agapov – St. Petersburg State Agrarian University (SPbSAU), Pushkin, Russia. Email: different76@list.ru.

© Азапов Д.С., Картошкин А.П., Калютик А.А.

Alexander P. Kartoshkin – St. Petersburg State Agrarian University (SPbSAU), Pushkin, Russia. *Email:* akartoshkin@yandex.ru.

Alexander A. Kalyutik – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). St. Petersburg. Orcid ID 0000-0002-2965-357X *Email:* aa_kalyutik@spbstu.ru.

Alexey V. Kondrashov – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). St. Petersburg. *Email:* kondrashov22@gmail.com.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 31.10.2023 г.

Отредактировано 22.11.2023 г.

Принято 23.11.2023 г.