

ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ СИНТЕЗА ОДНОСТАДИЙНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2020 Т. В. Лаптева, Н. Н. Зиятдинов✉, И. И. Емельянов, Д. А. Мицай

*Казанский национальный исследовательский технологический университет
ул. К. Маркса, 68, 420015 Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация*

Аннотация. Решение задач синтеза сложных технологических систем требует решения дискретно-непрерывных задач нелинейного программирования. Для обеспечения работоспособности синтезируемой системы необходимо учесть изменения в условиях функционирования, что приводит к учету жестких или мягких ограничений и интегральному виду функции цели в задаче оптимизации. В работе предлагается подход к решению задачи синтеза оптимальных систем одностадийного теплообмена при учете изменяющихся условий эксплуатации. Предлагаемый подход основан на разбиении области, которая характеризует изменение условий функционирования синтезируемой системы, на подобласти, имеющие меньшие размерности и меньший размера. Решение задачи синтеза одностадийной системы теплообменных аппаратов проводится на основе декомпозиции изначально заданной суперструктуры, которая включает все структуры систем одностадийного теплообмена, возможные для заданного набора горячих и холодных потоков, включенных в процесс теплообмена. Процедура декомпозиции проводится до уровня отдельного теплообменного аппарата и связанной с ним подобласти неопределенности. Это позволит провести декомпозицию исходной задачи на подзадачи проектирования оптимальных работоспособных подсистем теплообмена для двух потоков. Решение таких задач даст оценки эффективности подсистем теплообмена, не зависящие от изменения значений неопределенных параметров. Вычисление значения оценки эффективности проводится решением задачи проектирования подсистемы с учетом связанной с ней подобластью неопределенности. Решение проводится на основе одноэтапной задачи оптимизации с мягкими ограничениями. Определение оптимальной структуры системы проводится решением задачи о назначениях на основе полученных оценок. Это позволит построить гибкую оптимальную систему одностадийного теплообмена путем выбора и объединения подсистем с лучшими характеристиками эффективности.

Ключевые слова: синтез технических систем, оптимизация в условиях неопределенности, одностадийный теплообмен.

ВВЕДЕНИЕ

Синтез оптимальных работоспособных систем предполагает как обеспечение оптимальности работы синтезируемых систем,

так и выполнение проектных требований к работе создаваемой системы независимо от изменения условий ее эксплуатации [1].

Рассматривая в качестве искомой системы систему теплообменных аппаратов, ограничимся одностадийным теплообменом (ОСТ), когда горячие и холодные потоки участвуют в теплообмене один раз. Учет требования гиб-

✉ Зиятдинов Надир Низамович
e-mail: nnziat@yandex.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

кости или работоспособности искомой системы будет реализован за счет использования сведений об изменении условий ее эксплуатации в формулировке задачи синтеза. Информация об изменении условий эксплуатации синтезируемой ОСТ учитывается в задаче синтеза в виде параметров системы, называемых неопределенными [2]. Совокупность информации о неопределенных параметрах формирует область неопределенности, размерность которой соответствует числу параметров, относящихся к неопределенным, а совокупность диапазонов изменения их значений формирует размер области. Таким образом, для обеспечения работоспособности синтезируемой ОСТ необходимо выполнение проектных требований на заданной области неопределенности.

Анализ результатов предыдущих работ

Существующие методы синтеза оптимальных систем теплообменных аппаратов можно разбить на две группы: методы, основанные на термодинамическом анализе участвующих в теплообмене потоков, и методы, использующие для решения постановку задачи нелинейного программирования. При этом в обеих группах известны эффективные методы, как учитывающие, так и не учитывающие неопределенность в исходной информации при решении задачи.

Среди методов первой группы в первую очередь нужно упомянуть подход пинч-анализа, предложенный для теплоинтеграции в работах [3–5], а также методы, основанные на термодинамической оценке необратимости проектируемых СТ [6]. В работе [7] разработан метод, основанный на концепции тепловых стоков и источников, обобщенный в работе [8]. Дальнейшее развитие методов позволило учитывать изменчивость утилит, используемых для догрева и доохлаждения потоков [9, 10]. К методам первой группы также относятся эвристические методы, основанные на инженерном опыте [11, 12].

Рассмотренные методы решения задач теплоинтеграции предполагают неизменность информации о стоках и источниках тепла.

В то же время, известно, что функционирование технологических систем протекает в изменяющихся условиях. Подробный анализ источников и типов неопределенности дан в работе [13]. Очевидно, что исключение информации о возможных изменениях условий эксплуатации синтезируемой системы может привести к нарушению требований к ее работе. Для анализа поведения системы в изменяющихся условиях использовался анализ чувствительности синтезированной системы теплообменных аппаратов [14], подходы на основе генерации сценариев работы системы.

Использование стохастической модели неопределенности с известным законом распределения значений неопределенных параметров в задачах проектирования систем заданной структуры было использовано в развитии метода пинч-анализа. В работе [15] предложен метод стохастического пинч-анализа. Метод использует постановку задачи стохастического программирования с вероятностными ограничениями. Внесение информации о стохастической природе неопределенности в пинч-анализ используется в [16]. Попытки снизить вычислительные затраты на решение задач, осложненных наличием вероятностных ограничений, требующих проведения многомерного интегрирования, привели к использованию интервального анализа и нечетких множеств [17].

Подробный анализ термодинамических методов синтеза систем теплообменных аппаратов рассмотрен в работе [18]. Однако, рассматриваемые методы не предполагают оценки экономических затрат синтезируемых систем, что не позволяет гарантировать оптимальность систем в экономическом смысле.

Вторая группа методов основана на постановках задач нелинейного программирования [19]. Особое место в группе занимают методы интегрального синтеза оптимальных систем теплообмена, использующие поиск на суперструктуре [20]. Формализация решаемой задачи представляет собой задачу дискретно-непрерывного программирования, решение которой весьма трудоемко и часто осложняется многоэкстремальностью. Однако эти методы позволяют учитывать эконо-

мические критерии в оценке эффективности получаемого решения. Развитие методов широко используется для синтеза систем теплообменных аппаратов в условиях неопределенности [21].

Во второй группе методов следует выделить декомпозиционные методы решения задач синтеза одностадийных систем теплообменных аппаратов, которые сводятся к решению задач о назначениях, ранее предложенные в работе [22], и, в дальнейшем, развитые в [23]. Авторы предложили двухуровневую процедуру решения задачи, где на нижнем уровне для всех пар горячих и холодных потоков проводится проектирование элементарных блоков (ЭБ) теплообмена [23], оптимальных в смысле критерия суммарных приведенных капитальных и эксплуатационных затрат. Один ЭБ предусматривает теплообмен между горячим и холодным потоком с возможностью донагрева и доохлаждения до заданных температур. Вычисленные значения затрат служат экономическими оценками ЭБ на верхнем уровне процедуры [23], где решением задачи о назначениях проводится определение оптимальной структуры синтезируемой системы теплообмена. Однако представленные методы не учитывают в постановке задачи неопределенность в исходной информации.

Анализируя методы решения задач синтеза оптимальных ОСТ (ООСТ) при учете имеющейся неопределенности можно видеть, что учет неопределенности в постановке задачи приводит к разным оптимизационным моделям в зависимости от возможности уточнения значений неопределенных параметров в ходе работы ОСТ, предпочтений проектировщика относительно формализации критерия и ограничений задачи оптимизации. Также, как и в случае синтеза неоднородных систем, при синтезе ООСТ чаще всего используется критерий оптимальности в виде среднего значения оценки эффективности ООСТ за расчетный период ее работы. Формализация требований к работе ООСТ может иметь форму жестких ограничений, которые должны выполняться при любых изменениях условий работы ОСТ за расчетный период. Такие

ограничения используются в задачах робастной оптимизации.

Большое количество работ, посвященных синтезу работоспособных ООСТ, основаны на постановке задачи робастной оптимизации. Решение задачи реализуется в виде многоуровневой процедуры [21, 24]. На верхнем уровне строится оптимальная структура ООСТ и вычисляются оптимальные конструктивные и режимные параметры ООСТ для некоторой фиксированной точки области неопределенности, чаще – номинальной. Для этого решается задача смешанного нелинейного программирования одним из известных методов. Для сгенерированной ООСТ на нижнем уровне вычисляется значение индекса гибкости полученной системы [25] с целью оценки размера области работоспособности ООСТ. Если на заданной области неопределенности полученная ООСТ является неработоспособной, то подбираются новые размеры аппаратов и структура системы на верхнем уровне. Взаимодействие уровней процедуры решения задачи осуществляется через передачу на верхний уровень с нижнего уровня координат точек, которые показывают, при каких условиях работы синтезированная ООСТ не обеспечила выполнения проектных требований [26]. Для выявления таких точек часто используется предложенная в работе [27] идея построения множества точек области неопределенности, где система оказалась неработоспособной. Для ее построения на каждой итерации метода проводится анализ удовлетворения ограничений задачи. Такой подход весьма трудоемок даже при малом количестве неопределенных параметров, а при увеличении размерности области неопределенности вычислительные затраты возрастают экспоненциально. Кроме того, такой подход не позволяет учитывать закон распределения значений неопределенных параметров.

Другие подходы включают в задачу синтеза ОСТ требование работоспособности в виде ограничения на значение функции гибкости [27]. Вычисление значения функции гибкости связано с решением задачи многоэкстремальной недифференцируемой оптимизации.

В результате на одном уровне решается задача синтеза структуры ОСТ для набора точек в области неопределенности, а на нижнем уровне решается задача проектирования системы теплообменников заданной структуры в виде одноэтапной или двухэтапной задачи оптимизации [24]. Рассмотренные методы являются очень сложными и вычислительно затратными. Также, решение этих задач связано с проблемой многоэкстремальности.

Стремление получить более экономную систему приводит к использованию мягких ограничений для представления требований к ее работе. Конкретная форма таких ограничений зависит от полноты имеющейся информации. В настоящее время часто используются вероятностные ограничения при низких значениях риска [28]. Использование такой формы ограничений дает постановку задачи стохастической оптимизации с интегральной формой критерия и ограничений. Однако, в области синтеза ОСТ внимания этому типу ограничений уделяется мало, хотя при использовании термодинамических методов вероятностные ограничения применяются активно. Это может быть связано со сложностью вычисления ограничений [29].

В работе предложен подход к решению задачи синтеза ООСТ, представляющий развитие интегральных методов, основанных на поиске искомой системы на суперструктуре, и использующий декомпозицию области неопределенности на подобласти меньшей размерности. Предложенный подход позволит провести интеграцию метода решения задачи синтеза ООСТ, описанный в [23], и методов проектирования гибких технических систем, разработанных в [30, 31], в метод решения задач синтеза работоспособной ООСТ.

1. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Декомпозиция области неопределенности

Сформулируем задачу проектирования системы ОСТ учитывая информацию о изменении неопределенных параметров в поста-

новке задачи. Будем рассматривать одностадийный теплообмен между N горячими и N холодными потоками. Соответственно, проектируемая система будет включать N теплообменников. Если количество горячих потоков меньше, оно будет дополнено до N за счет потоков горячих утилит, для холодных потоков — за счет потоков холодных утилит. Описывая неопределенные параметры, будем рассматривать изменение параметров потоков, участвующих в теплообмене. Кроме того, будем учитывать параметры, определяющие теплообмен в теплообменном аппарате.

Тогда набор неопределенных параметров будет включать: параметры $\theta_i^{j,h}$, связанные с j -м горячим (h) потоком, $j = 1, \dots, N$, где $i = 1, \dots, P_j$ — номер параметра j -го потока; параметры $\theta_i^{q,c}$, связанные с q -м холодным (c) потоком, $q = 1, \dots, N$, где $i = 1, \dots, M_q$ — номер параметра q -го потока; параметры $\theta_i^{r,he}$, связанные с r -м ЭБ (he), включающем рекуператор, холодильник и нагреватель, где $i = 1, \dots, K_r$ — номер параметра r -го ЭБ.

Будем предполагать, что неопределенные параметры статистически независимы и их значения нормально распределены. Интервалы, в которых изменяются значения неопределенных параметров, обозначим как

$$\bar{\theta}_i^{j,h} \leq \theta_i^{j,h} \leq \bar{\theta}_i^{j,h}, \quad i = 1, \dots, P_j, \quad (1)$$

$$\bar{\theta}_i^{q,c} \leq \theta_i^{q,c} \leq \bar{\theta}_i^{q,c}, \quad i = 1, \dots, M_q,$$

$$\bar{\theta}_i^{r,he} \leq \theta_i^{r,he} \leq \bar{\theta}_i^{r,he}, \quad i = 1, \dots, K_r, \quad (2)$$

$$j = 1, \dots, N, \quad r = 1, \dots, N, \quad q = 1, \dots, N.$$

Диапазоны, указанные в (1)–(2), задают область неопределенности Ω . Полученная область неопределенности Ω имеет размерность

$$\dim_{\Omega} = \sum_{j=1}^N (P_j + M_j + K_j). \quad (3)$$

При использовании известных методов синтеза работоспособных ООСТ необходимо учитывать всю область Ω на каждом из уровней. Это приводит к значительным вычислительным затратам.

Предположим, что мы решили задачу и получили ООСТ из N ЭБ. Поскольку проводится синтез системы одностадийного теплообмена, то неопределенные параметры, связанные с одним ЭБ, не связаны с другими ЭБ из ООСТ.

Выделим из области Ω интервалы изменения значений неопределенных параметров, связанных с отдельным ЭБ с номером s , и получим N подобластей Ω_s , $s = 1, \dots, N$

$$\Omega_s = \Omega_h^s \cup \Omega_c^s \cup \Omega_{he}^s, \quad s = 1, \dots, N, \quad (4)$$

$$\Omega_h^s = \{\theta_i^{j_s, h} : \bar{\theta}_i^{j_s, h} \leq \theta_i^{j_s, h} \leq \bar{\theta}_i^{j_s, h}, i = 1, \dots, P_{j_s}\}, \quad (5)$$

$$s = 1, \dots, N,$$

$$\Omega_c^s = \{\theta_i^{q_s, c} : \bar{\theta}_i^{q_s, c} \leq \theta_i^{q_s, c} \leq \bar{\theta}_i^{q_s, c}, i = 1, \dots, M_{q_s}\}, \quad (6)$$

$$s = 1, \dots, N,$$

$$\Omega_{he}^s = \{\theta_i^{s, he} : \bar{\theta}_i^{s, he} \leq \theta_i^{s, he} \leq \bar{\theta}_i^{s, he}, i = 1, \dots, K_s\}, \quad (7)$$

$$s = 1, \dots, N,$$

где j_s, q_s — номера потоков, входящих в s -й ЭБ.

Очевидно, что верно утверждение

$$\Omega_s \subset \Omega, \quad s = 1, \dots, N. \quad (8)$$

Введем обозначение

$$\Psi = \bigcup_{s=1}^N \Omega_s. \quad (9)$$

Тогда легко видеть, что неверно будет следующее утверждение

$$\Psi = \Omega, \quad \forall N > 1. \quad (10)$$

Но будет верно утверждение

$$\Psi \subseteq \Omega. \quad (11)$$

Предельное состояние в (11) соответствует случаю $N = 1$.

Для случаев $N > 1$ будет верно

$$\dim_{\Psi} < \dim_{\Omega}, \quad (12)$$

где \dim_{Ξ} — размерность области Ξ .

В результате проведена декомпозиция исходной области неопределенности согласно выбору пар горячего и холодного потоков, участвующих в одностадийном теплообмене в одном ЭБ ООСТ. Способ можно распространить на случай суперструктуры, на которой проводится поиск структуры ООСТ. Предлагаемая декомпозиция области неопределенности будет согласована с декомпозиционным методом, предложенным в [23].

1.2. Формализация решаемых задач

Рассмотрим задачи, решаемые на нижнем уровне в подходе [22], с целью внесения неопределенности информации в их постановки. При построении ООСТ подход использует суперструктуру, представленную на рис. 1

(см. [22]), где учтена возможность доохлаждения и догрева потоков до требуемых температур. В соответствии суперструктуре ставится матрица размера $N \times N$. Строки матрицы соответствуют горячим потокам, а столбцы — холодным потокам, участвующим в теплообмене. На пересечении j -й строки и q -го

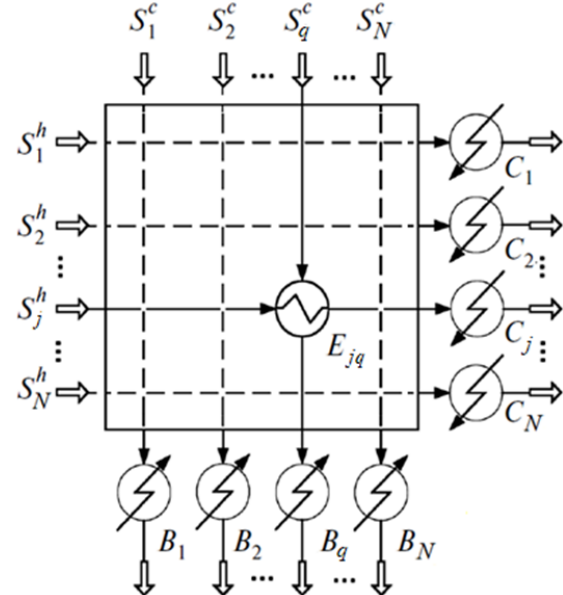


Рис. 1. Суперструктура ООСТ
[Fig. 1. SSHES Superstructure]

столбца матрицы стоит значение оценки эффективности оптимального ЭБ, где обмениваются теплом j -й горячий и q -й холодный потоки.

Очевидно, что для учета неопределенности при проектировании оптимального ЭБ требуется учесть соответствующую подобласть области неопределенности. Такая подобласть будет включать неопределенные параметры, относящиеся к j -му горячему и q -му холодному потокам, а также к теплообменным аппаратам, входящим в состав ЭБ.

Решение задачи проектирования оптимального ЭБ при учете неопределенности можно проводить на основе одноэтапной (ОЭЗО) или двухэтапной задач оптимизации [31]. Эффективные методы решения таких задач в приложении к проектированию работоспособных оптимальных технологических процессов при учете мягких ограничений предложены в [30, 31]. Достоинством предложенных в [31] методов является то, что решение задачи дает не только размеры аппаратов, составляющих си-

стему, но и значения режимных параметров системы, которые необходимо поддерживать для обеспечения ее работоспособности. В случае одноэтапной постановки задачи оптимизации предполагается, что во время эксплуатации системы невозможно получить точные значения неопределенных параметров в любой момент времени. В этом случае предполагается, что система должна работать в неизменном режиме.

Запишем задачу проектирования работоспособного оптимального ЭБ, в котором обмениваются теплом j -й горячий и q -й холодный потоки, на основе ОЭЗО с вероятностными ограничениями, в виде

$$F_{jq} = \min_{d,z} E[f_{jq}(d, z, \theta)] \quad (13)$$

$$\Pr\{h_v^{jq}(d, z, \theta) \leq 0\} \geq \alpha_v, \quad (14)$$

$$v = 1, \dots, p_2, \quad j = 1, \dots, N, \quad q = 1, \dots, N,$$

где

$$E[f_{jq}(d, z, \theta)] = \int_{\Omega_{jq}} f_{jq}(d, z, \theta) d\theta, \quad (15)$$

$$\tilde{\Omega}_{jq} = \left\{ \begin{array}{l} \theta \in \Omega_{jq}, \varphi_i^{jq}(d, z, \theta) = 0, \\ l = 1, \dots, p_1 \end{array} \right\}. \quad (16)$$

В (14) $h_v^{jq}(d, z, \theta)$, $v = 1, \dots, p_2$, — формализация требований к работе ОСТ, включающих требования на температуры выходных потоков ЭБ, и на обеспечение процесса теплообмена. В (16) система из p_1 уравнений представляет математическую модель ЭБ.

Обозначим количество неопределённых параметров, связанных с рассматриваемым ЭБ, как n_{jq} . Учитывая (4)–(7), значение n_{jq} равно

$$n_{jq} = P_j + M_q + K_s.$$

Для вычисления критерия в (13) будем использовать аппроксимацию, предложенную в [31], и предполагающую разбиение области неопределенности Ω_{jq} на подобласти T_r , $T_r = \{\theta : \theta_i^{L,r} \leq \theta_i \leq \theta_i^{U,r}, i = 1, \dots, n_{jq}\}$, $r = 1, \dots, R$,

$$E_{ap}[f_{jq}(d, z, \theta)] = \sum_{r=1}^R (a_r f_{js}(d, z, \theta^r) + \sum_{i=1}^{n_{jq}} \partial f_{jq}(d, z, \theta^r) / \partial \theta_i (E_r[\theta_i] - a_r \theta_i^r)), \quad (17)$$

$$\theta^r \in T_r,$$

$$a_r = \int_{T_r} \rho(\theta) d\theta = \prod_{i=1}^{n_{jq}} [\Phi(\tilde{\theta}_i^{U,r}) - \Phi(\tilde{\theta}_i^{L,r})], \quad (18)$$

$$E_r[\theta_i] = \prod_{t=1}^{i-1} [\Phi(\tilde{\theta}_t^{U,r}) - \Phi(\tilde{\theta}_t^{L,r})] \times \int_{\theta_i^{L,r}}^{\theta_i^{U,r}} \theta_i \rho(\theta_i) d\theta_i, \quad (19)$$

$$\tilde{\theta}_i^{L,r} = (\theta_i^{L,r} - \mu_i) / \sigma_i, \quad \tilde{\theta}_i^{U,r} = (\theta_i^{U,r} - \mu_i) / \sigma_i, \\ r = 1, \dots, R, \quad i = 1, \dots, n_{jq},$$

здесь $\Phi(\xi)$ — функция стандартного нормального распределения, $\mu_i, (\sigma_i)^2$ — матожидание и дисперсия параметра θ_i .

Расчет (14) будем проводить на основе метода сведения к детерминированному виду, предложенному в [30]. Одно ограничение (14) заменим двумя ограничениями

$$\sum_{l=1}^{P_v} \left(\prod_{i=1}^{n_{jq}-1} [\Phi(\tilde{\theta}_i^{U,v,l}) - \Phi(\tilde{\theta}_i^{L,v,l})] \cdot I_{n_{jq},v,l} \right) \geq \alpha_v, \quad (20)$$

$$h_v(d, z, \bar{\theta}_1^{v,l}, \dots, \bar{\theta}_{(n_{jq}-1)}^{v,l}, y_{v,l}) = 0, \quad (21) \\ v = 1, \dots, p_2, \quad l = 1, \dots, P_v,$$

где $\tilde{\theta}_i^{L,v,l} = (\theta_i^{L,v,l} - \mu_i) / \sigma_i$, $\tilde{\theta}_i^{U,v,l} = (\theta_i^{U,v,l} - \mu_i) / \sigma_i$, $\theta_i^{L,v,l}, \theta_i^{U,v,l}$ — границы области $Q_{v,l}$, $l = 1, \dots, P_v$, $i = 1, \dots, n_{jq}$, $v = 1, \dots, p_2$, полученной разбиением области Ω_s для повышения качества аппроксимации ограничений (14), $\bar{\theta}_i^{v,l} = 0.5(\theta_i^{L,v,l} + \theta_i^{U,v,l})$, $i = 1, \dots, (n_{jq} - 1)$, $v = 1, \dots, p_2$, $l = 1, \dots, P_v$.

Вычисление одномерного интеграла $I_{n_{jq},v,l}$ проводится по формуле

$$I_{n_{jq},v,l} = \begin{cases} \Phi((y_{v,l} - \mu_{n_{jq}}) / \sigma_{n_{jq}}) - \Phi(\tilde{\theta}_{n_{jq}}^{L,v,l}), \\ \text{если } \partial h_v(d, z, \theta) / \partial \theta_{n_{jq}} \geq 0, \\ \Phi(\tilde{\theta}_{n_{jq}}^{U,v,l}) - \Phi((y_{v,l} - \mu_{n_{jq}}) / \sigma_{n_{jq}}), \\ \text{если } \partial h_v(d, z, \theta) / \partial \theta_{n_{jq}} < 0, \end{cases}$$

где $y_{v,l}$ — значение неопределенного параметра с номером n_{jq} , при котором выполняется (21).

Мы получили последовательность оценок задачи (13)–(14) в виде задач нелинейного программирования

$$\bar{F}_{jq}^{(k)} = \min_{d,z,y_{v,l}} E_{ap}[f_{jq}(d, z, \theta)] \quad (22)$$

$$h_v(d, z, \bar{\theta}_1^{v,l}, \dots, \bar{\theta}_{(n_{jq}-1)}^{v,l}, y_{v,l}) = 0, \\ v = 1, \dots, p_2, \quad l = 1, \dots, P_v,$$

$$\sum_{l=1}^{P_v} \left(\prod_{i=1}^{n_{jq}-1} [\Phi(\tilde{\theta}_i^{U,v,l}) - \Phi(\tilde{\theta}_i^{L,v,l})] \cdot I_{n_{jq},v,l} \right) \geq \alpha_v. \quad (23)$$

Для уточнения оценки (22)–(23) будем уточнять используемые аппроксимации путем разбиения области неопределенности, как предложено в [30].

Очевидно, что решение задачи (13)–(14) даст значение оценки эффективности ЭБ, в котором обмениваются теплом j -й горячий и q -й холодный потоки, с учетом неопределенности. Отметим, что решение задачи (13)–(14) даст величину F_{jq} , не зависящую от изменения значений параметров θ . Она будет соответствовать элементу матрицы оценок, находящемуся на пересечении j_s -й строки и q_s -го столбца. Получив оценки эффективности F_{jq} , $j=1, \dots, N$, $q=1, \dots, N$, для всех N^2 элементов матрицы оценок, можно переходить к построению структуры синтезируемой ООСТ. Поскольку оценки в матрице не зависят от параметров θ , решение задачи можно проводить на основе обычной задачи о назначениях, как это предложено в [22]. Задача примет вид

$$\min_{z_{jq}} \sum_{j=1}^N \sum_{q=1}^N F_{jq} z_{jq} \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^N z_{jq} = 1, \sum_{q=1}^N z_{jq} = 1, z_{jq} = \{0;1\}. \quad (25)$$

Задача (24)–(25) является задачей дискретного линейного программирования, для ее решения разработаны эффективные методы. Результатом решения задачи (24)–(25) будут значения переменных z_{jq} , которые дадут требуемую структуру системы.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим синтез системы теплообменных аппаратов для одностадийного теплообмена, в котором участвуют 4 потока с брагоректификационной установки, включающей шесть колонн. Для апробации предлагаемого подхода были выбраны два холодных потока — S_1^c , S_2^c и два горячих потока — S_1^h , S_2^h . Параметры потоков и требования на их температуры приведены в табл. 1. Для донагрева потоков предусмотрено использование потока перегретого пара с температурой 152 °С и давлением 5 бар, для доохлаждения потоков используется поток холодной воды с температурой 20 °С и давлением 1 бар.

Перечень неопределенных параметров составляют температуры и массовые расходы потоков S_1^c , S_2^c , S_1^h , S_2^h . Таким образом, в задаче

Таблица 1. Параметры потоков
[Table 1. Streams parameters]

Характеристика потока	S_1^c	S_2^c	S_1^h	S_2^h
Температура, °С	18	30	82.9	124.1
Давление, бар	1	2.03	0.7	2.3
Общий массовый расход, кг/ч	35550	105835.2	10317.5	15591.9
Массовая доля компонента				
Этанол	0	0.0643	0.5523	0.0001
Вода	1	0.9326	0.4374	0.9999
Ацетальдегид	0	0	0.0006	0
Этилацетат	0	0	0.0015	0
Метилацетат	0	0	0.0002	0
Изобутанол	0	0.0003	0.001	0
н-Пропанол	0	0	0.0021	0
3-Метил-1-Бутанол	0	0.0006	0.0048	0
Диоксид углерода	0	0.0022	0.0001	0
Нижняя граница на температуру потока на выходе из системы, °С	80	63	71.16	требований нет

Таблица 2. Характеристика потоков и области неопределенности ЭБ
 [Table 2. Characterization of the Flows and the EB Uncertainty Area]

	№ ЭБ			
	1	2	3	4
Горячий поток, H^{in}	S_1^h	S_2^h	S_1^h	S_2^h
Неопределенные параметры	$\theta_T^{h,1}; \theta_F^{h,1}$	$\theta_T^{h,2}; \theta_F^{h,2}$	$\theta_T^{h,1}; \theta_F^{h,1}$	$\theta_T^{h,2}; \theta_F^{h,2}$
Холодный поток, C^{in}	S_1^c	S_1^c	S_2^c	S_2^c
Неопределенные параметры	$\theta_T^{c,1}; \theta_F^{c,1}$	$\theta_T^{c,1}; \theta_F^{c,1}$	$\theta_T^{c,2}; \theta_F^{c,2}$	$\theta_T^{c,2}; \theta_F^{c,2}$

8 неопределенных параметров, $\theta = \{\theta_T^{h,1}; \theta_F^{h,1}; \theta_T^{h,2}; \theta_F^{h,2}; \theta_T^{c,1}; \theta_F^{c,1}; \theta_T^{c,2}; \theta_F^{c,2}\}$. Область неопределенности представлена в виде совокупности интервалов $\theta_i^N - \delta_i \theta_i^N \leq \theta_i^N \leq \theta_i^N + \delta_i \theta_i^N$, $i = 1, \dots, 8$, для температур потоков принято значение $\delta = 0.1$, для массовых расходов $\delta = 0.3$.

Для решения задачи необходимо построить суперструктуру, включающую все возможные схемы одностадийного теплообмена для рассматриваемых потоков, и найти значения оценок эффективности оптимальных ЭБ. Очевидно, что суперструктура будет включать четыре ЭБ. Сочетания потоков, входящих в ЭБ, и перечень неопределенных параметров, формирующих область неопределенности для ЭБ представлены в табл. 2. Вычисление оценки эффективности ЭБ будем проводить на основе решения задачи (13)–(14).

В качестве критерия оценки эффективности работы ЭБ взяты суммарные затраты, включающие приведенные капитальные и эксплуатационные затраты. Капитальные затраты ЭБ включают затраты на основной теплообменник $c_1 (A_E^{jq})^{0.75}$, где обмениваются теплом q -й холодный и j -й горячий потоки, а также на холодильник $c_1 (A_C^j)^{0.75}$ и нагреватель $c_1 (A_H^q)^{0.75}$, предназначенные для доохлаждения j -го горячего потока и донагрева q -го холодного потока. Эксплуатационные затраты включают стоимость холодной $c_3 F_w^j$ и горячей $c_2 F_{st}^q$ утилит. Вычисления проводились в предположении периода самоокупаемости системы в течение 6 лет, при 300 рабочих днях в году.

Критерий имеет вид

$$\frac{c_1 ((A_E^{jq})^{0.75} + (A_H^q)^{0.75} + (A_C^j)^{0.75})}{24 \cdot 300 \cdot 6} + c_2 F_{st}^q + c_3 F_w^j, \quad (26)$$

где $c_1 = 945$ руб/м² — стоимость стали в пересчете на метр квадратный площади теплообмена, $c_2 = 0,0121$ руб/кг — стоимость перегретого пара, $c_3 = 0,000428$ руб/кг — стоимость холодной воды, A_E^{jq}, A_H^q, A_C^j — поверхности теплообмена основного теплообменника, нагревателя и холодильника, м², F_{st}^q, F_w^j — расходы пара и воды, кг/ч, соответственно.

Поисковыми переменными задачи являются поверхности теплообмена A_E^{jq}, A_H^q, A_C^j и расходы утилит F_{st}^q, F_w^j . Поскольку задача (13)–(14) имеет вид одноэтапной задачи оптимизации, а выражение (26) зависит только от конструктивных и режимных переменных, то нет необходимости вычисления математического ожидания в (13).

В качестве ограничений задачи выбраны:

– требование на температуру холодного потока на выходе из ЭБ

$$\Pr\{T_{out}^q \geq T^{q,\min}\} \geq \alpha_1, \quad (27)$$

– требование на температуру горячего потока на выходе из ЭБ

$$\Pr\{T_{out}^j \geq T^{j,\max}\} \geq \alpha_2, \quad (28)$$

– требование на разницу температур между горячим потоком на входе в основной теплообменник и холодным потоком на выходе из него

$$\Pr\{T_{in}^j - T_{out}^q \geq 5\} \geq \alpha_3, \quad (29)$$

– требование на разницу температур между горячим потоком на выходе из основного теплообменника и холодным потоком на входе в него

$$\Pr\{T_{out}^j - T_{in}^q \geq 5\} \geq \alpha_4, \quad (30)$$

где $q = 1; 2$ — номера холодных потоков, $j = 1; 2$ — номера горячих потоков, индекс in обозначает входной поток ЭБ, индекс out —

Таблица 3. Результаты решения задачи (13)–(14) для ЭБ
 [Table 3. The results of the problem (13)–(14) solving for EB]

№ ЭБ	Значение критерия	A_E^{jq}	A_H^q	A_C^j	F_{st}^q	F_w^j
1	30.65	5254.35	1230.6	0	1041.39	0
2	46.93	4879.13	1535.34	0	2379.74	0
3	40.82	9750.99	1129.94	0	1247.38	0
4	77.21	8333.52	3987.2	0	3897.06	0

выходной. Уровни вероятности взяты равными $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.95$, $\alpha_3 = \alpha_4 = 1$. Значения $T^{q,\min}$, $T^{j,\max}$ приведены в табл. 1. Поскольку для потока Н2 нет требований на значение его температуры на выходе из системы, принято $T^{2,\max} = 124.1$.

Вычисленные значения оценок эффективности для каждого ЭБ, а также оптимальные значения поверхностей основного теплообменника, нагревателя и холодильника, горячих и холодных утилит, приведены в табл. 3.

Анализируя результаты, приведенные в табл. 3, можно видеть, что ни в одном из ЭБ не потребовалось проводить доохлаждение выходного потока до требуемой температу-

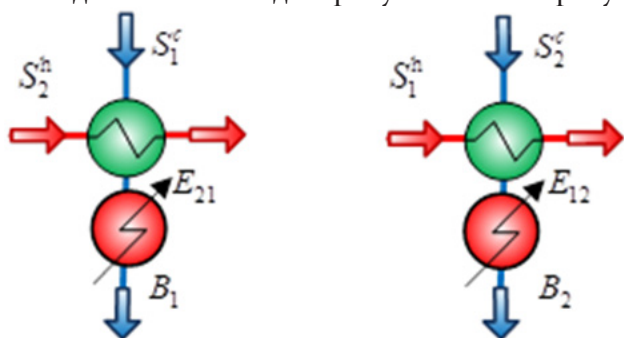


Рис. 2. Оптимальная структура работоспособной ОСТ

[Fig. 2. Optimal Structure of Flexible SSHEs]

ры, но во всех ЭБ используются горячие утилиты для донагрева выходного потока.

Решение задачи (24)–(25) дало оптимальную структуру системы одностадийного теплообмена (см. рис. 2), состоящую из ЭБ с номерами 2 и 3, давшей меньшие затраты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к решению задачи проектирования одностадийной системы теплообмена при учете неопределенности в

исходной информации, использующий декомпозицию области неопределенности. Сочетание способа декомпозиции области неопределенности с подходами к синтезу систем теплообмена без учета неопределенности [23] и методами проектирования систем с учетом неопределенности [30, 31] позволило избавиться от дискретно-непрерывной природы задачи проектирования структуры системы. Согласование декомпозиции области неопределенности и декомпозиции суперструктуры одностадийной системы теплообмена позволило решать задачи проектирования систем с учетом неопределенности на областях неопределенности меньшей размерности и размера. Получаемое решение дает оптимальные структуру системы, размеры аппаратов, входящих в систему и режимы работы системы, которые гарантируют ее работоспособность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены в Казанском национальном исследовательском технологическом университете при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант «Энергоресурсосберегающие процессы разделения жидких смесей для выделения промышленных растворителей».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Flexible here-and-now decisions for two-stage multi-objective optimization: method and

- application to energy system design selection / D. E. Hollermann [and etc.] // Optimization and Engineering. – 2020. – P. 1–27. DOI: 10.1007/s11081-020-09530-x.
2. *Alekseev, A. P.* Conceptual Approach to Designing Efficient Cyber-Physical Systems in the Presence of Uncertainty / A. P. Alekseev // Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modeling. – 2020. – Vol. 259. – P. 69–80. DOI: 10.1007/978-3-030-01818-4_3. 6.
 3. *Linnhoff, B.* Synthesis of Heat Exchanger Networks: I. Systematic Generation of Energy Optimal Networks / B. Linnhoff, J. R. Flower // AIChE J. – 1978. – Vol. 24. – P. 633–642. DOI: 10.1002/aic.690240411.
 4. *Umeda, T.* Heat exchanger systems synthesis / T. Umeda, J. Itoh, K. Shiroko // Chem. Eng. Prog. – 1978. – Vol. 74. – P. 70–76.
 5. *Townsend, D. W.* Heat and power networks in process design Part II. Design procedure for equipment selection and process matching / D. W. Townsend, B. Linnhoff // AIChE J. – 1983. – Vol. 29. – P. 748–771. DOI: 10.1002/aic.690290509.
 6. *Tsirlin, A. M.* Evaluation of irreversibility and optimal design of an integrated system of multiflow heat exchange / A. M. Tsirlin, A. A. Akhremenkov, S. Y. Boikov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2019. – Vol. 53. – P. 1001–1011. DOI: 10.1134/S0040579519060137.
 7. *Dhole, V. R.* Total Site targets for fuel, co-generation, emission and cooling / V. R. Dhole, B. Linnhoff // Comput. Chem. Eng. – 1993. – Vol. 17. – P. 101–109. DOI: 10.1016/0098-1354(93)80214-8.
 8. *Klemeš, J. J.* Targeting and design methodology for reduction of fuel, power and CO₂ on Total Site / J. J. Klemeš [and etc.] // Appl. Therm. Eng. – 1997. – Vol. 7. – P. 993–1003. DOI: 10.1016/S1359-4311(96)00087-7.
 9. *Chew, K. H.* Total Site Heat Integration considering pressure drops / K. H. Chew [and etc.] // Energies. – 2015. – Vol. 8. – P. 1114–1137. DOI: 10.3390/en8021114.
 10. *Tarighaleslami, A. H.* Total Site Heat Integration: Utility selection and optimization using cost and exergy derivative analysis / A. H. Tarighaleslami [and etc.] // Energy. – 2017. – Vol. 141. – P. 949–963. DOI: 10.1016/j.energy.2017.09.148.
 11. *Linnhoff, B.* The pinch design method of heat exchanger networks / B. Linnhoff, E. Hindmarsh // Chem. Eng. Sci. – 1983. – Vol. 38. – P. 745–763. DOI: 10.1016/0009-2509(83)80185-7.
 12. Chemical Process Equipment – Selection and Design : textbook / J. R. Couper [and etc.] // 2nd edition. Elsevier. – Gulf Professional Publishing. – Oxford, 2005. – 776 p.
 13. *Kraslawski, A.* Review of Applications of Various Types of Uncertainty in Chemical Engineering / A. Kraslawski // Chem. Eng. Process. – 1989. – Vol. 26. – P. 185–191. DOI: 10.1016/0255-2701(89)80016-9.
 14. *Liew, P. Y.* A numerical technique for Total Site sensitivity analysis / P. Y. Liew [and etc.] // Appl. Therm. Eng. – 2012. – Vol. 40. – P. 397–408. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.02.026.
 15. *Arya, D.* Stochastic Pinch Analysis to Optimize Resource Conservation Networks / D. Arya [and etc.] // Ind. Eng. Chem. Res. – 2018. – Vol. 57. – P. 16423–16432. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b03935.
 16. *Arya, D.* Iterative Pinch Analysis to Address Non-Linearity in a Stochastic Pinch Problem / D. Arya, S. Bandyopadhyay // J. Cleaner Prod. – 2019. – Vol. 227. – P. 543–553. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.078.
 17. *Bandyopadhyay, S.* Interval Pinch Analysis for Resource Conservation Networks with Epistemic Uncertainties / S. Bandyopadhyay // Ind. Eng. Chem. Res. – 2020. – Vol. 59. – P. 13669–13681. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c02811.
 18. *Klemeš, J. J.* New directions in the implementation of Pinch Methodology PM / J. J. Klemeš [and etc.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 98. – P. 439–468. DOI: 10.1016/j.rser.2018.09.030.
 19. *Biegler, L. T.* Nonlinear Programming: Concepts, Algorithms, and Applications to Chemical Processes. / L. T. Biegler. – SIAM. – Philadelphia: PA, 2010. – 416 p.
 20. *Yee, T. F.* Simultaneous optimization models for heat integration – II. Heat exchanger network synthesis / T. F. Yee, I.E. Grossmann // Comput. Chem. Eng. – 1990. – Vol. 14. – P. 1165–1184. DOI: 10.1016/0098-1354(90)85010-8.

21. *Pintarič, Z. N.* A methodology for the synthesis of heat exchanger networks having large numbers of uncertain parameters / Z. N. Pintarič, Z. Kravanja // *Energy*. – 2015. – Vol. 92. – P. 373–382. DOI: 10.1016/j.energy.2015.02.106.
22. *Kobayashi, S.* Synthesis of Optimal Heater Exchange System an Approach by the Optimal Assignment in Linear Programming / S. Kobayashi, T. Umeda, A. Ichikawa // *Chem. Eng. Sci.* – 1971. – Vol. 26. – P. 1367–1380. DOI: 10.1016/0009-2509(87)80057-X.
23. *Ostrovskii, G. M.* Designing a heat-exchange system upon the reconstruction and synthesis of optimal systems of distillation columns / G. M. Ostrovskii, N. N. Ziyatdinov, I. I. Emel'yanov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 50. – P. 178–187. DOI: 10.1134/S0040579516020147.
24. *Zheng, K.* A method for flexible heat exchanger network design under severe operation uncertainty / K. Zheng [and etc.] // *Chem. Eng. Technol.* – 2013. – Vol. 36. – P. 757–765. DOI: 10.1002/ceat.201200547.
25. *Zirngast, K.* A Robust Decomposition Methodology for Synthesis of Flexible Processes with Many Uncertainty Parameters – Application to HEN Synthesis / K. Zirngast, Z. Kravanja, Z. N. Pintarič // *Chem. Biochem. Eng. Q.* – 2018. – Vol. 4, No. 32. – P. 401–411. DOI: 10.15255/CA-BEQ.2018.1400.
26. *Li, J.* Structure and area optimization of flexible heat exchanger networks / J. Li. [and etc.] // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2014. – Vol. 53. – P. 11779–11793. DOI: 10.1021/ie501278c.
27. *Halemane, K. P.* Optimal process design under uncertainty / K. P. Halemane, I. E. Grossmann // *AIChE J.* – 1983. – Vol. 29. – P. 425–433. DOI: 10.1002/aic.690290312.
28. *Bernardo, F. P.* Model analysis and optimization under uncertainty using thinned cubature formulae / F. P. Bernardo // *Computers & Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 92. – P. 133–142. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.05.006.
29. *Küçükayavuz, S.* On mixing sets arising in chance-constrained programming / S. Küçükayavuz // *Math. Program.* – 2012. – Vol. 132, No. 1-2. – P. 31–56. DOI: 10.1007/s10107-010-0385-3.
30. *Lapteva, T. V.* An approach to solve the power and resource-intensive process design problem in a one-stage optimization problem form / T. V. Lapteva, A. S. Silvestrova, N. N. Ziyatdinov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 288. – 012102 p. DOI: 10.1088/1755-1315/288/1/012102.
31. *Ostrovsky, G. M.* Optimization problem with normally distributed uncertain parameters / G. M. Ostrovsky, N. N. Ziyatdinov, T. V. Lapteva // *AIChE Journal*. – 2013. – Vol. 59, No. 7. – P. 2471–2484. DOI: 10.1002/aic.14044.

Лаптева Татьяна Владимировна — д-р техн. наук, доц., профессор кафедры системотехники, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: tanlapteva@yandex.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2846-8337>

Зиятдинов Надир Низамович — д-р технических наук, профессор, зав. кафедрой системотехники, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: nnziat@yandex.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2314-8935>

Емельянов Илья Игоревич — канд. техн. наук, доц., доцент кафедры системотехники, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: ilyaemelyan@gmail.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0257-0739>

Мицай Дарья Александровна — аспирант кафедры системотехники, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: mda189@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5114-0391>

AN APPROACH TO THE PROBLEM OF SYNTHESISING SINGLE-STAGE HEAT EXCHANGE SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE UNCERTAINTY OF THE INITIAL INFORMATION

© 2020 T. V. Lapteva, N. N. Ziatdinov✉, I. I. Emelianov, D. A. Mitsai

*Kazan National Research Technological University
68, Karl Marx Street, 420015 Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation*

Annotation. To solve the problems of synthesising complex technological systems it is necessary to solve discrete-continuous problems of nonlinear programming. To ensure the functioning of a synthesized system, it is necessary to take into account changes in the operating conditions. This in turn involves considering hard or soft constraints and the integral form of the objective function in the optimization problem. The paper suggests an approach to the problem of synthesising optimal single-stage heat exchange systems taking into account changing operating conditions. The approach is based on partitioning the region that characterises the change in the operating conditions of the synthesized system into subregions of lower dimension and size. The problem of synthesising one-stage heat exchange systems is solved by decomposing the initial superstructure, which includes all possible structures of single-stage heat exchange systems for a given set of hot and cold streams. The decomposition is carried out at the level of an individual heat exchanger and the associated uncertainty subregion. This allows us to decompose the original problem into subproblems for designing optimal efficient heat exchange subsystems for two streams. Solving these problems we can obtain efficiency estimates for the heat exchange subsystems that do not depend on changes in the undefined parameters. The efficiency estimation is calculated by solving the subsystem design problem with regard to the corresponding uncertainty subregion. The solution is based on a single-stage optimisation problem with soft constraints. The optimal structure for the system is determined by solving the assignment problem based on the obtained estimates. We can thus construct a flexible, optimal single-stage heat exchange system by selecting and combining subsystems with the best efficiency characteristics.

Keywords: technical system synthesis, optimisation under uncertainty, single-stage heat exchange.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Hollermann D. E., Goerigk M., Hoffrogge D. F. et al. Flexible here-and-now decisions for two-stage multi-objective optimization: method

and application to energy system design selection // *Optimization and Engineering*. 2020. P. 1–27. DOI: 10.1007/s11081-020-09530-x.

2. Alekseev A. P. Conceptual Approach to Designing Efficient Cyber-Physical Systems in the Presence of Uncertainty // *Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modeling*. 2020. 259. P. 69–80. DOI: 10.1007/978-3-030-32579-4_6.

3. Linnhoff B. and Flower J. R. Synthesis of Heat Exchanger Networks: I. Systematic Generation of Energy Optimal Networks // *AIChE journal*. 1978. 24. P. 633–642. DOI: 10.1002/aic.690240411.

✉ Ziyatdinov Nadir N.
e-mail: nnziat@yandex.ru

4. Umeda T., Itoh J. and Shiroko K. Heat exchanger systems synthesis // *Chemical Engineering Progress*. 1978. 74. P. 70–76.
5. Townsend, D. W. and Linnhoff B. Heat and power networks in process design Part II. Design procedure for equipment selection and process matching // *AIChE journal*. 1983. 29. P. 748–771. DOI: 10.1002/aic.690290509.
- 6 Tsirlin A. M., Akhremenkov A. A. and Boikov S. Y. Evaluation of irreversibility and optimal design of an integrated system of multiflow heat exchange // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 53. 2019. P. 1001–1011. DOI: 10.1134/S0040579519060137.
7. Dhole V. R. and Linnhoff B. Total Site targets for fuel, co-generation, emission and cooling // *Computers & Chemical Engineering*. 1993. 17. P. 101–109. DOI: 10.1016/0098-1354(93)80214-8.
8. Klemeš J. J., Dhole V. R., Raissi K., Perry S. J. and Puigjaner L. Targeting and design methodology for reduction of fuel, power and CO₂ on Total Site // *Applied Thermal Engineering*. 1997. 7. P. 993–1003. DOI: 10.1016/S1359-4311(96)00087-7.
9. Chew K. H., Klemeš J. J., Alwi S. R. W., Manan Z. A. and Reverberi A. P. Total Site Heat Integration considering pressure drops. *Energies*. 2015. 8 (2). P. 1114–1137. DOI: 10.3390/en8021114.
10. Tarighaleslami A. H., Walmsley T. G., Atkins M. J., Walmsley M. R. W. and Nealea J. R. Total Site Heat Integration: Utility selection and optimization using cost and exergy derivative analysis // *Energy*. 2017. 141. P. 949–963. DOI: 10.1016/j.energy.2017.09.148.
11. Linnhoff B. and Hindmarsh E. The pinch design method of heat exchanger networks // *Chemical Engineering Science*. 38 (5). P. 745–763. DOI: 10.1016/0009-2509(83)80185-7.
12. Couper J. R., Penney W. R., Fair J. R. and Walas S. M. *Chemical Process Equipment: Selection and Design*. Oxford : Elsevier, Gulf Professional Publishing. 2005.
13. Kraslawski A. Review of Applications of Various Types of Uncertainty in Chemical Engineering // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 1989. 26 (3). P. 185–191. DOI: 10.1016/0255-2701(89)80016-9.
14. Liew P. Y., Alwi S. R.W., Varbanov P. S., Manan Z. A. and Klemeš J. J. A numerical technique for Total Site sensitivity analysis // *Applied Thermal Engineering*. 2012. 40. P. 397–408. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.02.026.
15. Arya D., Shah K., Gupta A. and Bandyopadhyay S. Stochastic Pinch Analysis to Optimize Resource Conservation Networks // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2018. 57 (48). P. 16423–16432. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b03935.
16. Arya D. and Bandyopadhyay S. Iterative Pinch Analysis to Address Non-Linearity in a Stochastic Pinch Problem // *Journal of Cleaner Production*. 2019. 227. P. 543–553. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.078.
17. Bandyopadhyay S. Interval Pinch Analysis for Resource Conservation Networks with Epistemic Uncertainties // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2020. 59 (30). P. 13669–13681. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c02811.
18. Klemeš J. J., Varbanov P. S., Walmsley T. G. and Jia X. New directions in the implementation of Pinch Methodology (PM) // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. 98. P. 439–468. DOI: 10.1016/j.rser.2018.09.030.
19. Biegler L. T. *Nonlinear Programming: Concepts, Algorithms, and Applications to Chemical Processes*. Philadelphia : PA, SIAM. 2010.
20. Yee T. F. and Grossmann I. E. Optimization models for heat integration –II. Heat exchanger network synthesis // *Computers & Chemical Engineering*. 1990. 14. P. 1165–1184. DOI: 10.1016/0098-1354(90)85010-8.
21. Pintaric Z. N. and Kravanja Z. A methodology for the synthesis of heat exchanger networks having large numbers of uncertain parameters // *Energy*. 2015. 92. P. 373–382. DOI: 10.1016/j.energy.2015.02.106.
22. Kobayashi S., Umeda T. and Ichikawa A. Synthesis of Optimal Heater Exchange System an Approach by the Optimal Assignment in Linear Programming // *Chemical Engineering Science*. 1971. 26 (9). P. 1367–1380. DOI: 10.1016/0009-2509(87)80057-X.
23. Ostrovskii G. M., Ziyatdinov N. N. and Emel'yanov I. I. Designing a heat-exchange system upon the reconstruction and synthesis of optimal

systems of distillation columns // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2016. 50. P. 178–187. DOI: 10.1134/S0040579516020147.

24. *Zheng K., Lou H. H., Wang J. and Cheng F.* A method for flexible heat exchanger network design under severe operation uncertainty // *Chemical Engineering & Technology*. 2013. 36. P. 757–765. DOI: 10.1002/ceat.201200547.

25. *Zirngast K. A., Kravanja Z. and Pintarič Z. N.* Robust Decomposition Methodology for Synthesis of Flexible Processes with Many Uncertainty Parameters – Application to HEN Synthesis // *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 2018. 4 (32). P. 401–411. DOI: 10.15255/CABEQ.2018.1400.

26. *Li J., Du J., Zhao Z. and Yao P.* Structure and area optimization of flexible heat exchanger networks // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014. 53 (29). P. 11779–11793. DOI: 10.1021/ie501278c.

27. *Halemane K. P. and Grossmann I. E.* Optimal process design under uncertainty // *AIChE Journal*. 1983. 29. P. 425–433. DOI: 10.1002/aic.690290312.

28. *Bernardo F. P.* Model analysis and optimization under uncertainty using thinned cubature formulae // *Computers & Chemical Engineering*. 2016. 92. P. 133–142. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.05.006.

29. *Küçükyavuz S.* On mixing sets arising in chance-constrained programming // *Mathematical Programming*. 2012. 132. P. 31–56. DOI: 10.1007/s10107-010-0385-3.

30. *Lapteva T. V., Silvestrova A. S. and Ziyatdinov N. N.* An approach to solve the power and resource-intensive process design problem in a one-stage optimization problem form // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. 288. P. 012102. DOI: 10.1088/1755-1315/288/1/012102.

31. *Ostrovsky G. M., Ziyatdinov N. N. and Lapteva T. V.* Optimization problem with normally distributed uncertain parameters // *AIChE Journal*. 2013. 59 (7). P. 2471–2484. DOI: 10.1002/aic.14044.

Lapteva Tatyava V. — DSc in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Process System Engineering, Kazan National Research Technological University.

E-mail: tanlapteva@yandex.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2846-8337>

Ziyatdinov Nadir N. — DSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Process System Engineering, Kazan National Research Technological University.

E-mail: nnziat@yandex.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2314-8935>

Emelianov Ilya I. — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Process System Engineering, Kazan National Research Technological University.

E-mail: ilyaemelyan@gmail.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0257-0739>

Mitsai Daria A. — postgraduate student, Department of Process System Engineering, Kazan National Research Technological University.

E-mail: mda189@mail.ru