

DOI: 10.17516/1999-494X-0424

УДК 666.1.031.222-712:005.591.1

Generalized Scheme of Implementation of the Phenomenological Heuristic-Evolutionary Approach in Optimizing the Thermal Insulation Structure of the Glass Furnace Enclosure

David V. Beknazarian*^a,

Georgy E. Kanewets^b and Alexander A. Fedyaev^c

^a*HIMMASH-APPARAT Limited Liability Company,
Dubna, Russian Federation*

^b*Academy of Sciences of Technological Cybernetics of Ukraine,
Kharkov, Ukraine*

^c*St. Petersburg State Forest Engineering University
named after S. M. Kirov,
St. Petersburg, Russian Federation*

Received 26.07.2022, received in revised form 14.08.2022, accepted 19.09.2022

Abstract. The relevance of adaptation of the phenomenological heuristic-evolutionary approach (method) of optimization by Professor G. E. Kanevets. (PHEA.GEK) consists in the development of a highly efficient optimization method developed for complex energy technology systems (ETS), which allows taking into account the peculiarities of operation, the operating parameters of the object, in relation to the thermal insulation constructions of glass furnaces (TTICGF), and in a broad sense, melting units similar in principle to glass furnaces, which are characterized by a sufficiently high variability in the case of the layout of such thermal insulation structures (tens of thousands of combinations) due to the presence of a wide range of manufactured thermal insulation and refractory materials, and the resulting flexibility of thermal regimes directed towards the intensification of melting processes. In such conditions, the choice of the optimal TICGF becomes a complex technical and economic task, for the solution of which an additive efficiency criterion has been developed and used in the study.

The main aim: to obtain tools for carrying out optimization calculations of the TTICGF to increase the thermal efficiency of glass furnaces, prolong the service life of refractory materials in conditions of continuous growth in the cost of energy carriers and the need to improve the quality of products.

Objects: high-performance bathroom flaming glass furnaces of continuous operation.

Methods: using the theory of heat and mass transfer; using a computational experiment to simulate the

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: david_beck@mail.ru

process of corrosion wear of refractory bars of the side fence of the furnace and the operation of the forced air cooling system, methods of mathematical modeling and analysis.

Results: a generalized scheme for the implementation of the phenomenological heuristic – evolutionary approach (method) has been adapted in relation to glass furnaces during the operation of which corrosion wear of heat-insulated side fences and other elements in contact with high-temperature melt occurs, the justification for the use of PHEA.GEK for cases of optimization of the TICGF.

Keywords: phenomenological heuristic-evolutionary approach (method) of optimization, efficiency criterion, glass furnace, side fence, thermal insulation constructions of glass furnaces.

Citation: Beknazarian, D. V., Kanewets, G. E., Fedyayev, A. A. Generalized scheme of implementation of the phenomenological heuristic-evolutionary approach in optimizing the thermal insulation structure of the glass furnace enclosure. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(6), 672–683. DOI: 10.17516/1999-494X-0424

Обобщённая схема реализации феноменологического эвристико-эволюционного подхода при оптимизации теплоизоляционной конструкции ограждения стекловаренной печи

Д. В. Бекназарян^а, Г. Е. Каневец^б, А. А. Федяев^в

*^аООО «ХИММАШ-АППАРАТ»,
Российская Федерация, Дубна*

*^бАкадемия наук технологической кибернетики Украины
Украина, Харьков*

*^вСанкт-Петербургский лесотехнический университет
им. С. М. Кирова»
Российская Федерация, Санкт-Петербург*

Аннотация. Актуальность адаптации феноменологического эвристико-эволюционного подхода (метода) оптимизации проф. Г.Е. Каневца (ФЭЭМО.ГЕК) заключается в освоении высокоэффективного метода оптимизации, разработанного для сложных энерготехнологических систем (ЭТС) и позволяющего учитывать особенности работы, режимные параметры объекта (применительно к теплоизоляционным конструкциям стекловаренных печей – ТКСП), а в широком смысле и плавильных агрегатов схожего со стекловаренными печами принципа действия, для которых характерна достаточно высокая вариативность в случае компоновки таких теплоизоляционных конструкций (десятки тысяч вариантов комбинаций) из-за наличия широкой номенклатуры выпускаемых теплоизоляционных и огнеупорных материалов. Возникающая при этом гибкость тепловых режимов направлена в сторону интенсификации процессов плавления. В таких условиях выбор оптимальной ТКСП становится сложной технико-экономической задачей, для решения которой разработан и используется в исследовании аддитивный критерий эффективности.

Цель: получение инструментария проведения оптимизационных расчётов ТКСП для повышения тепловой эффективности стекловаренных печей, продления срока службы огнеупорных материалов в условиях непрерывного роста стоимости энергоносителей и необходимости повышения качества выпускаемой продукции.

Объекты: высокопроизводительные ваннные пламенные стекловаренные печи непрерывного действия.

Методы: использование теории тепломассообмена; использование вычислительного эксперимента для моделирования процесса коррозионного износа огнеупорных брусьев бокового ограждения печи и работы системы принудительного воздушного охлаждения, методы математического моделирования и анализа.

Результаты: адаптирована обобщённая схема реализации феноменологического эвристико-эволюционного подхода (метода) применительно к стекловаренным печам, в процессе работы которых происходит коррозионный износ теплоизолированных боковых ограждений и других элементов, контактирующих с высокотемпературным расплавом. Выполнено обоснование использования ФЭМО.ГЕК для случаев оптимизации ТКСП.

Ключевые слова: феноменологический эвристико-эволюционный подход (метод) оптимизации, критерий эффективности, стекловаренная печь, боковое ограждение, теплоизоляционная конструкция стекловаренной печи.

Цитирование: Бекназарян, Д.В. Обобщённая схема реализации феноменологического эвристико-эволюционного подхода при оптимизации теплоизоляционной конструкции ограждения стекловаренной печи / Д.В. Бекназарян, Г.Е. Каневец, А.А. Федяев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(6). С. 672–683. DOI:10.17516/1999-494X-0424

Введение

Важная задача в процессе эксплуатации высокопроизводительных стекловаренных печей – продление срока службы огнеупорных материалов, наиболее подверженных высокотемпературной физико-химической коррозии [1–4]. Наибольшему воздействию по интенсивности процесса и общей площади разрушений подвержено боковое ограждение, которое имеет сложную многослойную структуру и выполняет функции как несущего, так и теплоизолирующего элемента конструкции печи [5–7]. В этой связи длительность работы огнеупорных брусьев варочного бассейна напрямую влияет на продолжительность кампании стекловаренной печи. Благодаря существованию практики так называемых горячих ремонтов можно увеличить длительность кампании печи за счёт наложения в местах усиленной коррозии (зона раздела трёх фаз на линии зеркала стекломассы) дополнительных плиток из стеклоустойчивых материалов. При этом эффективная тепловая изоляция ограждения $R \approx 1$ ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}$) [5] вызывает повышение температуры огнеупорных брусьев варочного пространства печи, что, в свою очередь, увеличивает скорость коррозии огнеупоров [8]. Таким образом, выбор оптимальной комбинации материалов бокового ограждения теплоизоляционной конструкции стекловаренной печи (ТКСП) является первостепенной задачей при проектировании печей и их холодном ремонте.

Основные принципы комплексной оптимизации установок и оборудования на основе феноменологического эвристико-эволюционного подхода

Под феноменологическим подходом понимается учет и использование специфики объектов оптимизации (например, схем, режимов и оборудования производств). Это позволяет существенно уменьшить размерность задач комплексной оптимизации технических систем и создать комплекс оптимизационных методов, практически реализуемый на современных ЭВМ (электронно-вычислительных машинах), имеющий широкую область приложения по объектам и задачам расчета.

Приведенные в [9] критерии эффективности технических систем, как правило, являются аддитивными, то есть представляют собой сумму критериев эффективности элементов. Именно это обстоятельство предопределяет, что основная сложность и трудоёмкость расчёта критериев эффективности технических систем находится на уровне расчёта критериев эффективности элементов.

Выбор применяемых методов поиска экстремума зависит от размерности оптимизационной задачи.

В [10] показано, что применительно к рассматриваемой ситуации размерность оптимизационной задачи составляет более 45 тысяч вариантов. Следовательно, непосредственное применение общеизвестных методов оптимизации многофакторных задач при высоких требованиях к точности расчёта критерия эффективности становится затруднительным, а зачастую и невозможным.

Для преодоления указанных трудностей решения комплекса оптимизационных задач в исследовании применён феноменологический эвристико-эволюционный подход Г. Е. Каневца [11–13], основанный на учете специфики схем, режимов и оборудования сложных систем.

Оптимизация схем, режимов и оборудования проводится до тех пор, пока, например, аддитивные приведенные затраты энерготехнологических систем (ЭТС) не достигнут минимума либо уменьшатся по сравнению с исходным вариантом на заданную величину.

Реализация феноменологического эвристико-эволюционного подхода Г. Е. Каневца возможна и при создании новых реакторов (таких как печи для плавления базальта [14]) или оптимизации существующих ёмкостей с применением футеровки [15].

В последнем случае целесообразно применение принципа гибридизаций моделей. Согласно подходу, предложенному проф. Г. Е. Каневцом, разрабатываются точные и сложные модели для каждого вида оборудования, и на их основе (путем расчетно-теоретического анализа) проводится эквивалентирование моделей, то есть создаются простые модели, по точности практически не уступающие сложным для фиксированной области исходным данным. Оптимизация оборудования проводится с помощью этих простых моделей с периодическим их уточнением путем обращения к сложным моделям.

Обобщённая схема реализации феноменологического эвристико-эволюционного подхода при оптимизации бокового ограждения печи

Необходимость в феноменологическом эвристико-эволюционном подходе (ФЭЭМО.ГЕК) [16] объясняется большой размерностью задачи оптимизации ЭТС на всех уровнях иерархии и сложностью, громоздкостью расчёта целевой функции ЭТС, когда непосредственное применение прямых методов оптимизации многофакторных задач затруднительно или даже невозможно.

В нём применяются следующие основные эвристико-эволюционные процедуры.

1. Выбираются некоторые исходные: топология (схема) и режим работы ЭТС. Они могут быть получены методами предварительной оптимизации (например, эксерготопологической), ограничивающими область поиска экстремума, либо заданы исходя из опыта проектировщиков.

2. С помощью алгоритма синтеза топологии сложных схем формируется матрица смежности топологии ЭТС с проверкой её реальности.

3. Производится расчет материальных и тепловых балансов ЭТС и её элементов. В итоге находятся их режимные параметры на входе и выходе.

4. При этих режимных параметрах оптимизируются элементы (оборудование) ЭТС. При этом используются описанные выше прямые методы поиска экстремума либо упрощённые эвристико-эволюционные процедуры.

5. Осуществляется технико-экономический анализ ЭТС. Устанавливаются элементы, вносящие наиболее весомый вклад в критерии эффективности.

6. Для этих элементов используются технико-экономические и другие эвристики, с помощью которых изменяется топология и режим работы ЭТС с целью улучшения критерия эффективности.

7. Расчет повторяется с пункта 2.

Таким образом, обеспечивается эволюция схем и режимов к оптимуму.

Отметим, что методы оценки термодинамического совершенства теплотехнологических систем, в частности эксергетический и пинч-анализ, могут быть использованы для получения эвристик, углубляющих поиск с помощью феноменологического эвристико-эволюционного подхода оптимальных схем и режимных параметров установок.

Функциональная схема реализации феноменологического эвристико-эволюционного подхода при оптимизации бокового ограждения печи с помощью методического и информационного обеспечения подсистемы технологического автоматизированного проектирования и оптимизации объекта (решения задач КОЭТС) показана на рис. 1.

Здесь приняты следующие условные обозначения: P – режим, P_n – исходный режим, P_o – оптимальный режим, O – ограждение стекловаренной печи, O_o – оптимальное ограждение, АФОР – алгоритм формирования режима, АРО – алгоритм расчета оборудования (одного варианта без оптимизации), ТМОО – точные модули оптимизации оборудования (типа ОКТА, ОАВО), ГЭМАОО – гибридизированные и эквивалентированные модули алгоритмов оптимизации оборудования.

При реализации феноменологического эвристико-эволюционного подхода используются несколько подсистем.

1. Подсистема формирования режимов (ПФР).
2. Подсистема эвристико-эволюционной оптимизации объекта (ПЭЭО).
3. Подсистема сервиса (ПС).
4. Подсистема информационного обеспечения (ПИО), включающая в себя базы данных.

Подсистемы ПФР, ПС, ПИО в принципе инвариантны относительно метода поиска экстремума (метода оптимизации) и поэтому могут применяться при использовании других методов оптимизации сложных ЭТС.

При замене ПЭЭО на другую подсистему, реализующую подход к оптимизации, отличный от феноменологического эвристико-эволюционного, обобщенная функциональная схема сохраняет свою целостность и лишь изменяет качество.

Алгоритм оптимизационной задачи

Основными компонентами систем оптимизации оборудования и установок выступают алгоритмы расчёта их показателей и критериев эффективности, а также алгоритмы поиска экстремума критериев эффективности.

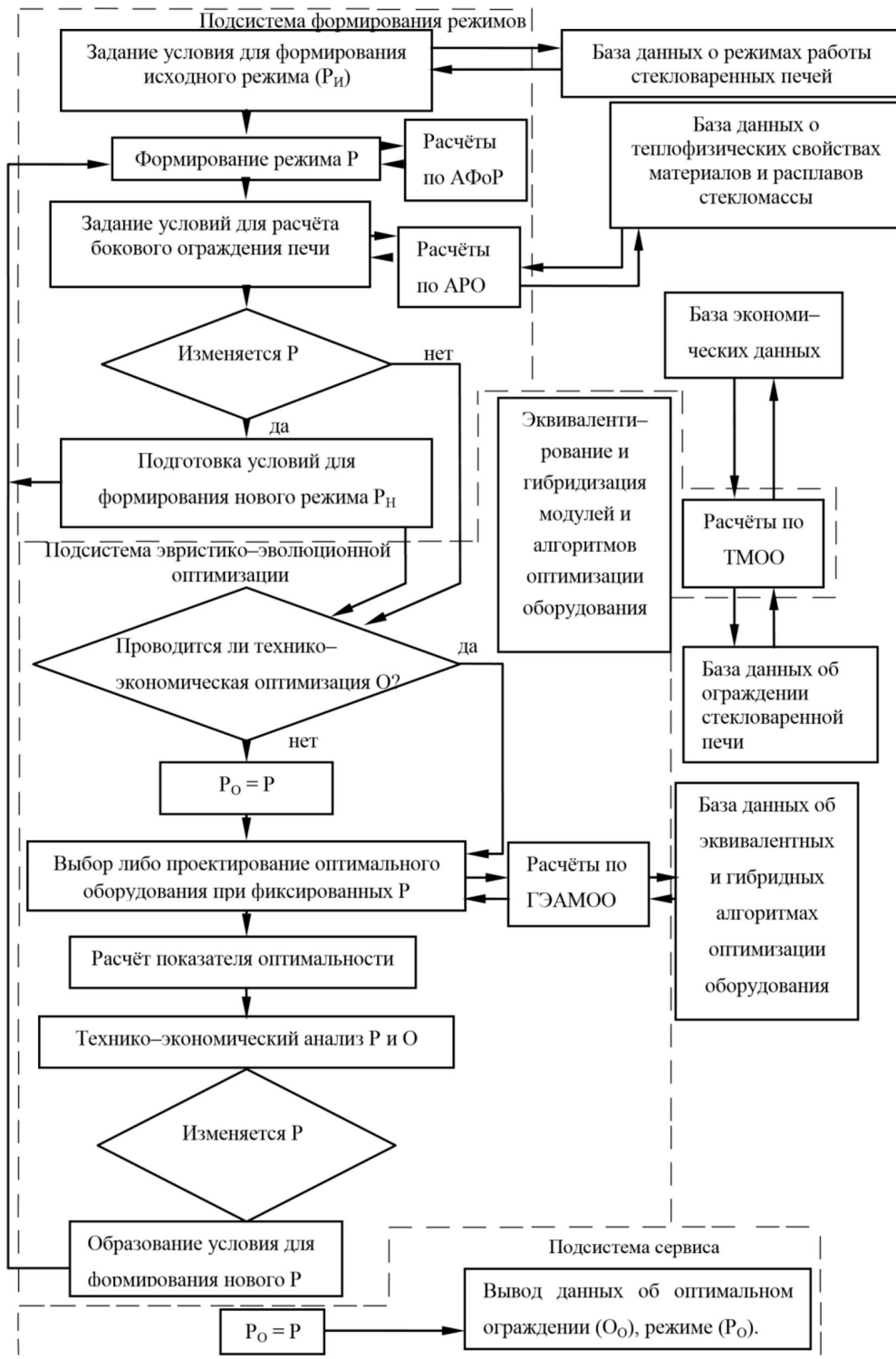


Рис. 1. Обобщённая функциональная схема реализации феноменологического эвристико-эволюционного подхода при оптимизации ограждения печи

Fig. 1. Generalized functional diagram of the implementation of the phenomenological heuristic-evolutionary approach when optimizing the furnace enclosure

Цель расчетов – обоснование при проектировании новых либо реконструируемых производств оптимальности конструкции и материального оформления бассейна стекловаренной печи, его конструктивных параметров, типы применяемых огнеупорных и теплоизоляционных материалов, использование системы охлаждения, её параметры и др. Перечисленные задачи могут решаться в комплексе, отдельно каждая или в любом сочетании. От этого зависит состав независимых переменных.

Блок-схема реализации алгоритма оптимизации бокового ограждения стекловаренной печи (рис. 2) аналогична схеме реализации эвристико-эволюционного метода оптимизации проф. Г.Е. Каневца (ФЭЭМО.ГЕК) ЭТС и состоит из следующих этапов.

1. Компоновка схемы конструкции ограждения варочного бассейна (задаётся уровень температур в зоне пламенного пространства и в зоне варочного бассейна, назначается режим

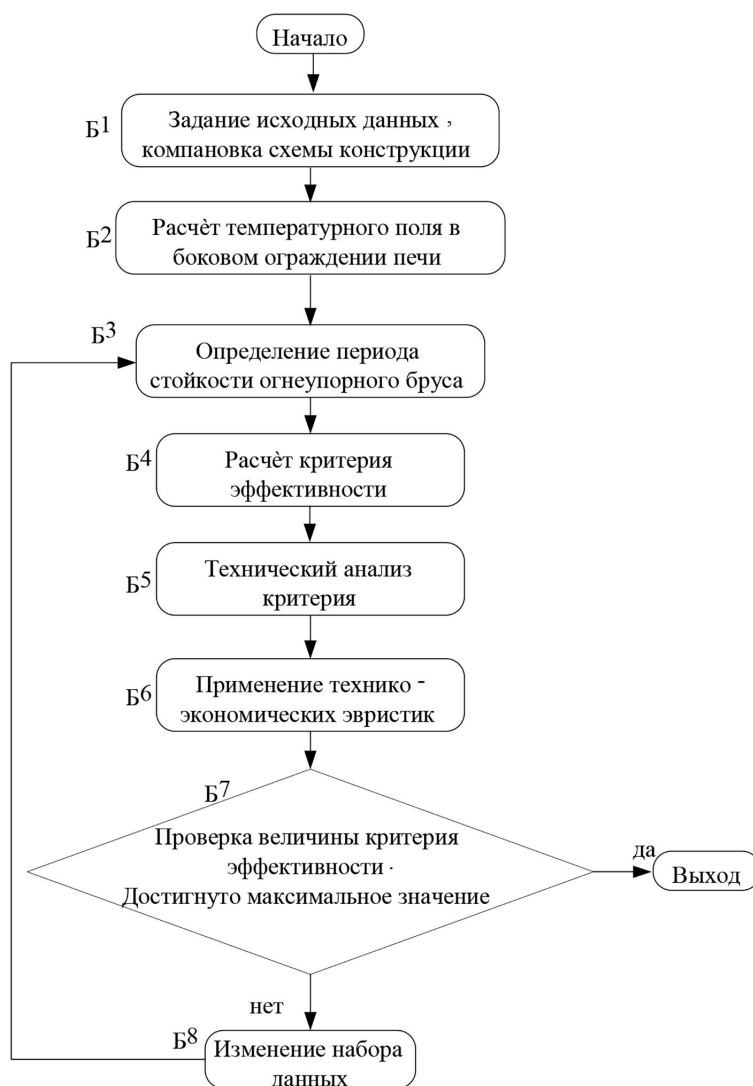


Рис. 2. Блок-схема реализации оптимизационного алгоритма

Fig. 2. Block diagram of the implementation of the optimization algorithm

работы системы принудительного воздушного охлаждения, то есть определяется набор переменных, которые в дальнейшем оптимизационном расчёте будут независимыми).

2. Расчёт температурного поля в боковом ограждении печи и пристенном слое стекло-массы.

3. Определение периода стойкости огнеупорного бруса в зависимости от исходных параметров и величины тепловых потерь с погонного метра бокового ограждения.

4. Расчёт критерия эффективности.

5. Осуществление технического анализа путём установления параметров, вносящих наиболее весомый вклад в критерии эффективности.

6. Применение технико-экономических показателей и эвристик, с помощью которых изменяются конструктивное исполнение бокового ограждения, режим работы печи или режим работы системы принудительного воздушного охлаждения с целью улучшения значений критериев эффективности. Тем самым обеспечивается эволюция компоновки конструкции и режимов к оптимуму.

7. Блок-схема изменения набора исходных данных.

8. Расчёт выполнялся с блока 2.

Методологическая основа эвристико-эволюционного метода – эвристическое программирование или теория эвристических решений, теория адаптации и самоорганизации, теория поиска оптимальных решений на основе упорядоченного перебора [17].

Эвристическое правило представляет собой некоторое утверждение, выступающее результатом обобщения существующих научных знаний в некой предметной области (химии, физике, теоретических основах теплотехнической технологии и кибернетики теплотехнологических процессов), либо некоторые гипотезы, допущения или предположения исследователя, либо совокупность факторов, обобщающих многолетний практический опыт принятия рациональных решений специалистами. Выбор эвристики осуществляется случайным образом по величине её весового коэффициента, значение которого изменяется в зависимости от результатов предыдущих попыток синтеза с использованием алгоритма обучения [18–20].

Использование каждого ЭП (эвристического правила) может привести к выбору рационального решения задачи, не гарантируя в общем случае нахождения оптимального решения. Для разработки эвристических методов и алгоритмов необходимо создать фонд эвристических правил, который может содержать следующие компоненты:

- фонд ЭП толщин материалов;
- фонд ЭП сочетаний теплоизоляционных материалов;
- фонд ЭП высот материалов;
- фонд ЭП расположения соплового аппарата системы воздушного охлаждения.

Эвристические правила компоновки теплоизоляции следующие.

1. Размещать слои тепловой изоляции, соприкасающиеся с высокотемпературной наружной поверхностью огнеупорного материала, с минимальным коэффициентом теплопроводности. Это позволяет резко снизить удельную плотность теплового потока на единицу поверхности, а также температуру на поверхности теплоизоляционного слоя.

2. Использовать теплоизоляционные материалы с более высоким коэффициентом теплопроводности и меньшей стоимостью по сравнению с материалом первого слоя. Данные мате-

риалы могут компоноваться в несколько слоёв разной толщины, причём данный уровень несёт на себе основную функцию по снижению температуры и удельной плотности теплового потока.

3. Заключительные слои теплоизоляционной панели могут быть выполнены из широко доступных изоляционных материалов со значениями коэффициента теплопроводности, характерными для тепловой изоляции, применяемой в случае изоляции поверхностей, имеющих относительно невысокую температуру.

4. Суммарная толщина теплоизоляционной панели не должна превышать 350 мм.

5. Сопротивление теплопроводности теплоизоляционной панели стремится к максимуму, одновременно стоимость панели минимальна.

Использование эвристических правил, которые отображают физико-химические, технологические, конструкционные и технико-экономические ограничения компоновки теплоизоляционных панелей, позволяет применять эвристико-эволюционный метод поиска оптимального сочетания изоляционных материалов.

Самообучающаяся процедура оптимального выбора ЭП из некоторого заранее составленного набора базируется на использовании аппарата либо теории вероятностей, либо теории нечётких множеств [17].

При использовании теории вероятностей происходит случайный выбор эвристик, каждой из которых присвоен оценочный коэффициент, величина которого равна вероятности предпочтительного выбора этой эвристики на данном этапе оптимизации.

Значения весовых оценочных коэффициентов эвристик, используемых в той или иной серии попыток оптимизации, изменяются по результатам предыдущих оптимизационных итераций в соответствии с алгоритмом самообучения. Для первой итерации оценочный коэффициент всех ЭП одинаков. Значения оценочных коэффициентов ЭП корректируются со вторым приближением по результатам наиболее показательной попытки последней серии в сравнении с предыдущими сериями. Показательной попыткой называют либо такую «наилучшую попытку», в результате которой получен оптимальный вариант теплоизоляционной панели (т.е. панели с минимальными критериями эффективности, если последняя серия обеспечила синтез оптимального по сравнению с предыдущими сериями попыток варианта теплоизоляционной панели), либо такую «наихудшую попытку», в результате которой синтезирован наихудший вариант теплоизоляционной панели (т.е. вариант с максимальным значением КЭ, если последняя серия попыток обеспечила наихудший по сравнению с предыдущими сериями вариант теплоизоляционной панели).

Значения оценочных коэффициентов эвристик, использованных при реализации «наилучшей попытки», на последующей серии попыток синтеза увеличиваются, а значения оценочных коэффициентов эвристических правил, использованных при синтезе «наихудшей попытки», уменьшаются, что и обеспечивает процедуру самообучения.

Заключение

Предложенная обобщённая схема (ФЭЭМО.ГЕК) и блок-схема реализации оптимизационного алгоритма применительно к стекловаренным печам позволяет реализовать процесс выбора оптимального ТКСП пламенных стекловаренных печей непрерывного действия различной производительности, что позволяет снизить тепловые потери в окружающую среду наряду

с продлением срока службы огнеупорных брусев, что приводит к увеличению длительности кампании печи. Данный факт для высокопроизводительных печей позволяет увеличить объём выпускаемой стекломассы, что в денежном эквиваленте может составлять около 100 млн руб. за кампанию.

Список литературы / References

[1] Кучерявый М.Н., Попов О.Н. Кинетика коррозии огнеупоров расплавом многощелочного тарного стекла, *Огнеупоры*, 1985, 3, 22–27 [Kucheryavyy M.N., Popov O.N. Kinetics of corrosion of refractories by melt of multi-alkali container glass, *Ogneupory*, 1985, 3, 22–27 (in Russian)].

[2] Павловский В.К., Соболев Ю.С. Температурные зависимости коррозии огнеупоров в расплавах бариевоборсиликатных стёкол, *Стекло и керамика*, 1992, 6, 14–15 [Pavlovskiy V.K., Sobolev Yu. S. Temperature dependences of corrosion of refractories in melts of barium boron silicate glasses, *Steklo i keramika*, 1992, 6, 14–15. (in Russian)].

[3] Павловский В.К., Соболев Ю.С. Коррозия огнеупоров в расплавах свинцовосиликатных стекол, *Стекло и керамика*, 1992, 8, 12–13 [Pavlovskiy V.K., Sobolev Yu. S. Corrosion of refractories in melts of lead silicate glasses, *Steklo i keramika*, 1992, no. 8, 12–13 (in Russian)].

[4] Семенов Б.А., Озеров Н.А. Тепловое сопротивление пристенного слоя стекломассы в зоне высокотемпературной коррозии огнеупорных стен варочного бассейна стекловаренных печей, *Стекло и керамика*, 2016, 5, 3–8 [Semenov B. A., Ozerov N. A. Thermal resistance of the wall layer of molten glass in the high-temperature corrosion zone of the refractory walls of the melting tank of glassmaking furnaces, *Glass and Ceramics*, 2016, 5, 3–8 (in Russian)].

[5] Дзюзер В.Я. Огнеупоры для варочной части стекловаренных печей, *Огнеупоры и техническая керамика*, 2008, 5, 24–32 [Dzyuzer V. Ya. Refractories for glass-melting tank of glass furnaces, *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2008, 5, 24–32 (in Russian)].

[6] Дзюзер В.Я. Энергоэффективная структура тепловой изоляции стекловаренных печей, *Огнеупоры и техническая керамика*, 2012, 1–2, 33–36. [Dzyuzer V. Ya. Energy-efficient structure of thermal insulation of glass furnaces, *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2012, 1–2, 33–36 (in Russian)].

[7] Дзюзер В.Я. Конструирование огнеупорной кладки варочного бассейна высокопроизводительных стекловаренных печей, *Огнеупоры и техническая керамика*, 2007, 8, 14–22. [Dzyuzer V. Ya. Design of refractory masonry of the melting basin of high-performance glass melting furnaces *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2007, 8, 14–22 (in Russian)].

[8] Бекназарян Д.В., Каневец Г.Е., Строгонов К.В. К определению теплового состояния изоляции ванн стекловаренных печей на основе вычислительного эксперимента, *Промышленная энергетика*, 2021, 3, 18–27. [Beknazaryan D. V., Kanevets G. E., Strogonov K. V. Determining the thermal state of the insulation of glass melting furnaces on the basis of a computational experiment, *Promyshlennaya energetika*, 2021, 3, 18–27 (in Russian)].

[9] Каневец Г.Е. *Обобщённые методы расчета теплообменников*, Киев, Наукова думка, 1979. 352 с. [Kanevets G. E. *Obobshchonnnyye metody rascheta teploobmennikov Generalized methods for calculating heat exchangers*, Kiyev, Naukova dumka, 1979. 352 p. (in Russian)].

[10] Бекназарян Д. В., Каневец Г. Е., Строгонов К. В. Критерии эффективности теплоизоляционных конструкций стекловаренных печей, *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2021, 14(4), 459–471 [Beknazaryan D. V., Kanevets G. E., Strogonov K. V. Efficiency criteria for heat-insulating structures of glass furnaces *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2021, 14(4), 459–471 (in Russian)].

[11] Каневец Г. Е., Берлин М. А. *Принципы автоматизированного проектирования и оптимизации химико-технологических производств*, Киев, Знание, 1981. 29 с. [Kanevets G. E., Berlin M. A. *Principles of computer-aided design and optimization of chemical-technological productions*. Kiyev, Znaniye, 1981. 29 p.].

[12] Каневец Г. Е. *Проблемы исследования сложных систем и их элементов. Состояние и перспективы системных исследований химико- и энерготехнологических объектов*. Киев, Наукова думка, 1986. 153 с. [Kanevets G. E. *Problems of research of complex systems and their elements. Status and prospects of systematic research of chemical and energy technology objects*. Kiyev, Naukova dumka, 1986. 153 p. (in Russian)].

[13] Каневец Г. Е. *Пути повышения эффективности технических систем и их элементов на основе вычислительного эксперимента*. Киев, Знание, 1988. 104 с. [Kanevets G. E. *Ways to improve the efficiency of technical systems and their elements on the basis of a computational experiment*. Kiyev, 1988. 104 p. (in Russian)].

[14] Strogonov K. V. Energy-efficient furnace for basalt fiber production. *Advances in Composites Science and Technologies 2020, Journal of Physics: Conference Series 1990 012030*, Philadelphia, Institute of Physics Publ., 2021. 1–7.

[15] Strogonov K., Tolkanov S., Korkots K., Fedyukhin A. Термостатическая крышка для повышения энергетической и технологической эффективности сталелитейных заводов [Thermostatic cover for improving energy and technological efficiency of steel mills]. *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya SPbWOSCE-2018 Biznes-tekhnologii dlya ustoychivogo razvitiya gorodov* [International Science Conference SPbWOSCE-2018 Business Technologies for Sustainable Urban Development] E 3S Web of Conferences 110, 01003 (2019), 2019, 1–9.

[16] Beknazarian, D.V., Kanevets, G.E., Strogonov, K.V. Methodological bases of optimization of thermal insulation structures of glass furnaces. X International school-seminar young scientists and specialists “Energy saving – theory and practice”. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683 052027, Philadelphia, Institute of Physics Publ., 2020, 1–9.

[17] Каневец Г. Е., Берлин М. А. Методы поиска экстремума критериев эффективности энерготехнологических систем. *GeoИнжиниринг*, 2012, 2(14), 52–56. [Kanevets G. E., Berlin M. A. Methods for finding the extremum of efficiency criteria for energy technology systems. *GeoInzhiniring*, 2012, 2 (14), 52–56. (in Russian)].

[18] Системный подход к повышению эффективности энерготехнологических систем и оборудования на основе оптимизационного вычислительного эксперимента. Г. Е. Каневец. Краснодар, *GeoИнжиниринг*. 2012, 2 (14). 57–67. [Kanevets G. E. A systematic approach to improving the efficiency of energy technology systems and equipment based on an optimization computational experiment. *GeoInzhiniring*, 2012, 2 (14). 57–67. (in Russian)]

[19] Кафаров В. В., Мешалкин В. П. *Анализ и синтез химико-технологических систем*. М., Химия, 1991. 432 с. [Kafarov V.V., Meshalkin V.P. *Analysis and synthesis of chemical-technological systems*. Moskva, Khimiya, 1991. 432 p. (in Russian)]

[20] Каневец Г.Е., Зайцев И.Д., Головач И.И. *Введение в автоматизированное проектирование теплообменного оборудования*. Киев, Наукова думка, 1985. 232 с. [Kanevets G.E., Zaytsev I.D., Golovach I.I. *Introduction to computer-aided design of heat exchange equipment*. Kiyev, Naukova dumka, 1985. 232 p.].