

УДК 536.7

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-15-22

Моделирование энергосберегающих промышленных установок с термохимической регенерацией

А.Б. Гаряев, В.С. Глазов, С.В. Жубрин, С.К. Попов

Показана важность разработки научно-технических решений по созданию энергосберегающих и экологически чистых технологий на основе термохимической регенерации (ТХР) теплоты продуктов сгорания природного газа. Для решения задачи предложено использовать программный комплекс SCAN (Steam Conversion ANalyzer), созданный на основе численного исследования процессов, протекающих при термохимической регенерации и предназначенный для обеспечения информационной поддержки, необходимой при разработке технологических схем с ТХР.

Характерной особенностью комплекса является объединение математических моделей, предназначенных для расчета технологических схем (моделей с сосредоточенными параметрами или системных), и моделей для расчета процессов гидродинамики и теплообмена с химическими реакциями в аппаратах, входящих в состав технологических схем (моделей с распределенными параметрами или детальными).

В комплексе предусмотрен выбор пакетов и подпрограмм, минимизирующих время и необходимые ресурсы. Кроме того, возможно отслеживание зависимостей значений искомым характеристик от детальности (точности) модельного описания исследуемого процесса. В состав комплекса входит библиотечный модуль, который содержит технологические схемы установок и отдельные аппараты, входящие в их состав. К каждому примеру приложены рекомендации по моделированию и организации процессов, полученные в результате численных расчетов. В качестве иллюстрации приведены два примера использования комплекса для разработки схемных решений и моделирования процессов, связанных с ТХР. Первый пример посвящен расчетной схеме с ТХР теплоты отходящих газов ГТУ, а второй — моделированию по алгоритму, объединяющему системные и детальные расчеты.

Отмечено, что программный комплекс SCAN позволяет исследовать влияние конструктивных характеристик аппаратов (в том числе конструкции реакционных элементов, образующих реактор конверсии), а также режимных параметров процесса на степень завершенности конверсии, дает возможность оценить экономию топлива в технологическом процессе или при выработке электроэнергии.

Ключевые слова: высокотемпературные теплотехнологические установки, термохимическая регенерация, программный комплекс, математическая модель, газотурбинная установка.

Для цитирования: Гаряев А.Б., Глазов В.С., Жубрин С.В., Попов С.К. Моделирование энергосберегающих промышленных установок с термохимической регенерацией // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 15—22. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-15-22.

Simulating Energy-Saving Industry-Grade Installations Involving Thermochemical Heat Recovery

A.B. Garyaev, V.S. Glazov, S.V. Zhubrin, S.K. Popov

The article explains importance of elaborating scientific and technical solutions aimed at creating energy-saving and environmentally friendly technologies based on thermochemical recovery (TCR) of the heat of natural gas combustion products. To address this challenge, the authors propose to use the SCAN (Steam Conversion Analyzer) software package, a computation system based on the results from numerical investigation of the processes that occur during thermochemical heat recovery and intended for providing the necessary information support to specialists in charge for developing process flow diagrams involving the use of TCR.

A characteristic feature of the above-mentioned software system is that it combines mathematical models intended for calculating process flow diagrams (represented by lumped-parameter or system models) and models for calculating hydrodynamic and heat-and-mass transfer processes accompanied by chemical reactions in the apparatuses included in the composition of process flow diagrams (represented by distributed-parameter or detailed models).

The SCAN package allows the user to select packages and subroutines that make it possible to minimize the computation time and resources required to perform the computation. In addition, the system includes features for tracking how the values of sought characteristics depend on the degree of detail (accuracy) of the model describing the process under study.

The SCAN software system includes a library module containing the process flow diagrams of installations and individual apparatuses within their composition. Each example is supplemented with recommendations for modeling and arranging the processes, which were obtained as a result of numerical calculations. Two examples of using the SCAN software system for elaborating circuit solutions and simulating the processes involving TCR are given. The first example is devoted to the scheme for analyzing the TCR of the heat of gas turbine exhaust gases, and the second one is devoted to modeling the processes according to an algorithm combining system and detailed calculations.

It is pointed out that the SCAN software system offers the possibility to study the effect the design features of apparatuses (including the design of reaction elements that make up the conversion reactor) and the process operating parameters have on the conversion completeness degree. It also allows the user to evaluate the saving of fuel in a production process or in generating electricity.

Key words: high-temperature thermal process installations, thermochemical heat recovery, software system, mathematical model, gas-turbine unit.

For citation: Garyaev A.B., Glazov V.S., Zhubrin S.V., Popov S.K. Simulating Energy-Saving Industry-Grade Installations Involving Thermochemical Heat Recovery. MPEI Vestnik. 2017; 4: 15—22. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-15-22.

Введение

Изучение показателей работы высокотемпературных установок в различных отраслях промышленности показывает возможность достижения существенного энергосберегающего эффекта от применения термохимической регенерации теплоты высокотемпературных отходящих газов — продуктов горения топлива [1—9].

Термохимическая регенерация — способ повышения термодинамической эффективности технологических либо энергетических установок путем конверсии исходного органического топлива за счет поглощения им теплоты, отводимой из установки с высокотемпературными отходящими газами. В результате образуется новое топливо — синтез-газ, теплота сгорания которого (в расчете на единицу исходного топлива) выше теплоты сгорания исходного топлива.

Целесообразность применения ТХР для экономии природного газа в России обусловлена:

- широким применением природного газа как ценного и экологически чистого топлива (более 50 % в энергетическом балансе страны) и его экспортными поставками в зарубежные страны;
- значительным потенциалом экономии природного газа посредством осуществления термохимической регенерации (до 20...25 % при проведении только термохимической регенерации и более при использовании комбинированных схем термохимической и термической регенерации) [10—18];
- большим количеством высокотемпературных теплотехнологических установок в различных отраслях промышленности (в первую очередь в черной металлургии и промышленности строительных материалов) и энергетических установок с низким коэффициентом использования теплоты топлива. Из них удаляются продукты сгорания с высокой температурой, которые могут быть использованы для термохимической регенерации.

В то же время, несмотря на большое количество публикаций по данному направлению [19—23], отмечается практически полное отсутствие реально работающих установок рассматриваемого типа. Проектированию установок с ТХР должен предшествовать их

адекватный расчет, который затруднен сложностью математического описания процессов тепломассообмена и гидродинамики с неравновесными химическими превращениями, значительными лучистыми потоками, существенной переменностью теплофизических свойств в аппаратах — реакторах конверсии природного газа со сложной геометрией проточной части.

Исходя из изложенного, разработка научно-технических решений по созданию энергосберегающих и экологически чистых технологий на основе ТХР теплоты продуктов сгорания природного газа является актуальной задачей. Ее решение возможно с помощью программного комплекса SCAN (Steam Conversion ANalyzer), созданного авторами для обеспечения информационной поддержки, необходимой при разработке технологических схем с ТХР на основе численного исследования процессов, протекающих при термохимической регенерации. Авторы полагают, что ориентированный таким образом программный комплекс может быть эффективно применен при создании энергосберегающих высокотемпературных технологических и энергетических установок.

Характеристика программно-вычислительного комплекса SCAN

Важной особенностью программно-вычислительного комплекса SCAN является объединение математических моделей, предназначенных для расчета технологических схем (моделей с сосредоточенными параметрами или системных) и моделей для расчета процессов гидродинамики и тепломассообмена с химическими реакциями в аппаратах, входящих в состав технологических схем (моделей с распределенными параметрами или детальными).

В комплексе предусмотрена возможность выбора пакетов и подпрограмм, которые, с точки зрения пользователя, минимизируют время и ресурсы, необходимые для получения результатов. Кроме того, указанная возможность позволяет отследить зависимость значимых искомым характеристик от детальности (точности) модельного описания исследуемого процесса и принять правильное решение.

Основу комплекса составляют математические модели:

- с распределенными параметрами, описывающие процессы тепло- и массообмена с учетом термохимических превращений в реакторе конверсии;
- описывающие работу и характеристики теплоэнергетических и теплотехнологических установок с ТХР как единую систему, включающую в себя взаимодействующие аппараты.

Библиотечный модуль программно-вычислительного комплекса SCAN содержит следующие примеры.

1. Кожухотрубный реактор конверсии.
2. Модели конверсионной термохимии.
3. Дожигание и утилизация теплоты газовых выбросов.
4. Образование окислов азота в методической печи.
5. Распределение тепловых потоков в печном объеме.
6. Реактор конверсии газового топлива.
7. Система ТХР, совмещенная с камерой дожигания.
8. Автотермический реактор паровой конверсии.
9. Объединенная модель схемы с термохимической регенерацией.
10. Теплообмен пучка штыковых труб (труб Фильда).
11. Комбинированные системы теплообменников.
12. Регенеративный подогрев воздуха для обжиговой печи.
13. Расчет тепловой схемы стекловаренной печи с системой ТХР теплоты отходящих газов.
14. Расчет схемы с ТХР теплоты отходящих газов газотурбинных установок (ГТУ).

В данный список включены примеры, относящиеся как к технологическим схемам установок, так и к отдельным аппаратам, входящим в их состав. Все они могут быть воспроизведены пользователем с его исходными данными, включающими конструктивные и режимные параметры, и распространены на объекты подобного рода. В каждом рассмотренном примере есть рекомендации по моделированию процессов либо по лучшей их организации, полученные в результате численных расчетов.

Примеры использования комплекса SCAN для разработки схемных решений и моделирования процессов, связанных с термохимической регенерацией

Пример 1. Расчет схемы с термохимической регенерацией теплоты отходящих газов газотурбинной установки

Известно, что повышение КПД ГТУ путем увеличения температуры в камере сгорания ограничено механической прочностью лопаток турбины. В то же время использование синтез-газа, полученного при утилизации теплоты продуктов сгорания, не только обеспечивает прямую экономию природного газа, но и повышает КПД ГТУ, поскольку снижаются потери теплоты выхлопных газов в атмосферу. Применение ТХР в системе магистральных газопроводов позволило бы

решить проблему утилизации теплоты выхлопных газов газоперекачивающих агрегатов.

Постановка задачи: расчет схемы газотурбинной установки с применением ТХР на основе паровой конверсии метана.

Тепловая схема установки представлена на рис. 1. Продукты сгорания после турбины разделяются на два потока: один поток выбрасывается в дымовую трубу, а второй направляется на обеспечение теплотой системы конверсии природного газа. В данной схеме реализовано параллельное подключение теплообменных аппаратов в тракте продуктов сгорания.

Программа для расчета схемы представляет собой модель ГТУ с реактором паровой конверсии с сосредоточенными параметрами. Она выполнена в математическом пакете MATLAB – Simulink и интегрирована в программный комплекс через единый интерфейс.

Модель состоит из двух блоков: конверсии топлива и газотурбинной установки и предназначена для упрощенной теоретической оценки эффективности использования синтез-газа, полученного методом термохимической регенерации высокопотенциальной теплоты от стороннего источника.

В блок конверсии топлива входит модель реактора конверсии, в котором температура в зоне реакции постоянна, а состав синтез-газа — равновесный. В рамках указанных допущений состав синтез-газа на выходе из реактора однозначно определяется температурой реакции и исходным составом парогазовой смеси — параметрами, являющимися исходными данными для расчета.

Состав парогазовой смеси на входе в реактор однозначно определяется соотношением объемных расхо-

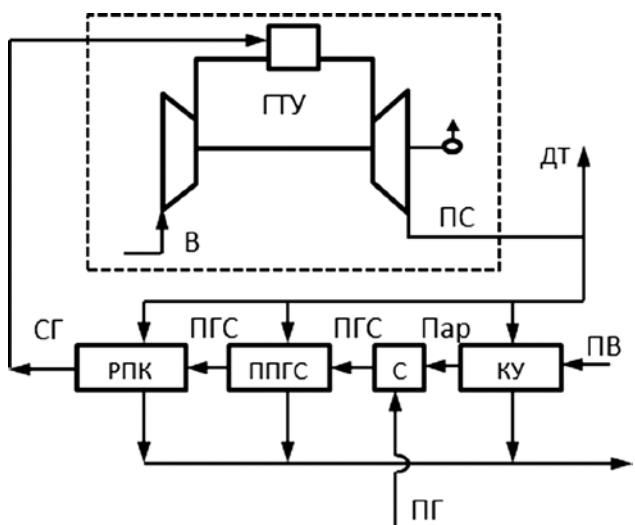


Рис. 1. Схема газотурбинной установки с ТХР:

ГТУ — газотурбинная установка; В — воздух; ПС — продукты сгорания; ДТ — дымовая труба; ПГС — подогреватель парогазовой смеси; КУ — котел-утилизатор; С — смеситель; РПК — реактор паровой конверсии; ПВ — питательная вода; ПГ — природный газ; ПГС — парогазовая смесь; СГ — синтез-газ

дов пара и метана — основного компонента природного газа. При тестовом моделировании это соотношение изменялось от 2 до 3.

Модель газотурбинной установки построена по инженерной методике расчета ГТУ. Принимается, что горение синтез-газа в камере сгорания — полное, т. е. в продуктах горения могут присутствовать только следующие компоненты: диоксид углерода, водяной пар, азот, кислород.

Все основные параметры элементов ГТУ, а также параметры состояния исходных веществ уже заданы. Модель используется в режиме поверочного расчета.

В исходные данные по ГТУ включены расход воздуха через компрессор ГТУ и расход синтез-газа.

Установлено, что состав синтез-газа влияет как на расход исходного топлива в газотурбинной установке, так и на ее КПД. С этой точки зрения для оценки эффективности применения синтез-газа в ГТУ интересны следующие величины:

- расход топлива в камере сгорания ГТУ;
- расход исходного топлива (метана);
- мощность на валу турбины;
- эффективный КПД ГТУ;
- количество теплоты, необходимой для нагрева и конверсии парогазовой смеси.

Эти параметры являются выходными данными модели.

Для контроля адекватности моделирования в выходные данные входят: степень конверсии метана; теплота сгорания и состав синтез-газа на выходе из реактора конверсии.

В качестве исходных данных необходимы следующие величины.

1. Температура исходного топлива (метана) — 15 °С.
2. Температура питательной воды — 10 °С.

3. Температура пара на выходе из котла-утилизатора — 250,36 °С.

4. Давление, при котором происходит конверсия — 1 атм.

5. Характеристика работы ГТУ:

- электрическая мощность установки — 16 МВт;
- степень повышения давления в компрессоре — 15;
- температура газов перед турбиной — 1000 °С;
- внутренний относительный КПД компрессора и турбины — 85 и 80 % соответственно;
- КПД камеры сгорания и электрогенератора — 99 и 90 % соответственно.

6. Отношение объемного расхода пара к объемному расходу исходного топлива — 2 м³/м³.

7. Температура дымовых газов после котла-утилизатора и подогревателя парогазовой смеси — 150 °С.

По результатам расчета становятся известны необходимый расход природного газа, окислителя, состав синтез-газа и отходящих газов, а также основные параметры работы ГТУ. Имея эти данные, можно оценить целесообразность применения технологии ТХР в газотурбинных установках.

При переходе от традиционной ГТУ к схеме с ТХР наблюдается снижение температуры уходящих газов, увеличение КПД цикла и удельной мощности на валу турбины. Относительная экономия топлива составляет до 20 %.

Таким образом, несмотря на то, что температура продуктов сгорания за турбиной ГТУ сравнительно невысока, можно добиться существенной экономии топлива при производстве электроэнергии на базе ГТУ.

Пример 2. Моделирование по алгоритму, объединяющему системные и детальные расчеты

На рис. 2 показана схема обжиговой печи с системой ТХР теплоты отходящих газов, а также системный адаптер

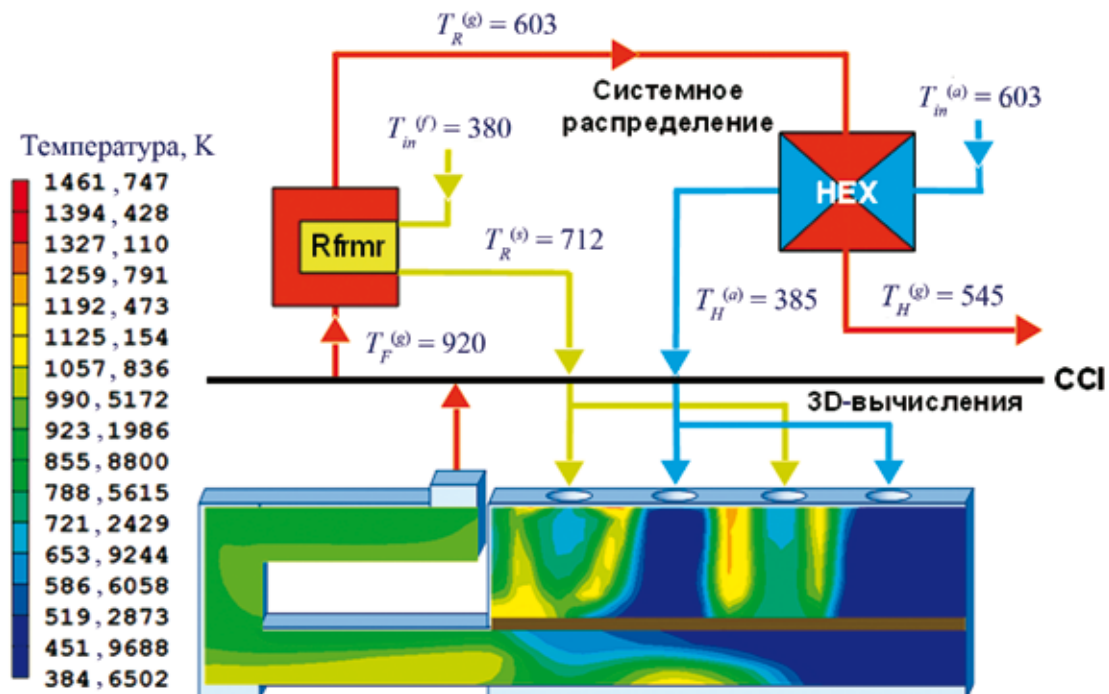


Рис. 2. Пример организации вычислений

Code Coupling Interface (CCI), осуществляющий двусторонний обмен граничными условиями между детальным и системным решателями для обеспечения неразрывности процессов переноса теплоты и массы в системе.

В печи сжигается топливо, смешение которого с воздухом происходит непосредственно в рабочем пространстве. Отличительной особенностью схемы является наличие реактора конверсии (R_{jmr}), в котором в результате химического взаимодействия метана и водяного пара образуется синтез-газ. Поток продуктов сгорания, покидающий печь, последовательно проходит реактор конверсии и воздухоподогреватель (НЕХ). Подогретый воздух используется в печи для сжигания синтез-газа. Горелки распределены по длине печи.

Все процессы, протекающие в рассматриваемой системе, тесно связаны друг с другом. Условия на выходе из каждого элемента установки являются входными параметрами для другого элемента. Если при этом стоит задача получения полей распределения переменных в реакторе конверсии, то выполняется детальный расчет тепломассообмена с использованием трехмерных уравнений сохранения.

Результат применения такого подхода показан на рис. 3, где объединение детальной модели реактора конверсии с моделями сосредоточенных параметров для других элементов схемы позволило в едином вычислительном процессе рассчитать поля переменных в объеме реактора.

Структурная схема моделирования по объединенному алгоритму изображена на рис. 4.

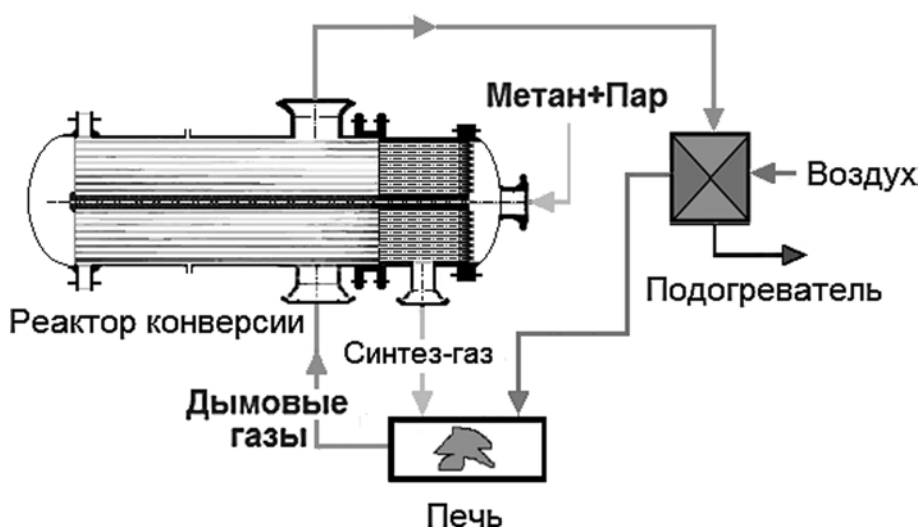


Рис. 3. Моделирование по объединенному алгоритму: расчет распределения концентраций водорода в реакторе конверсии

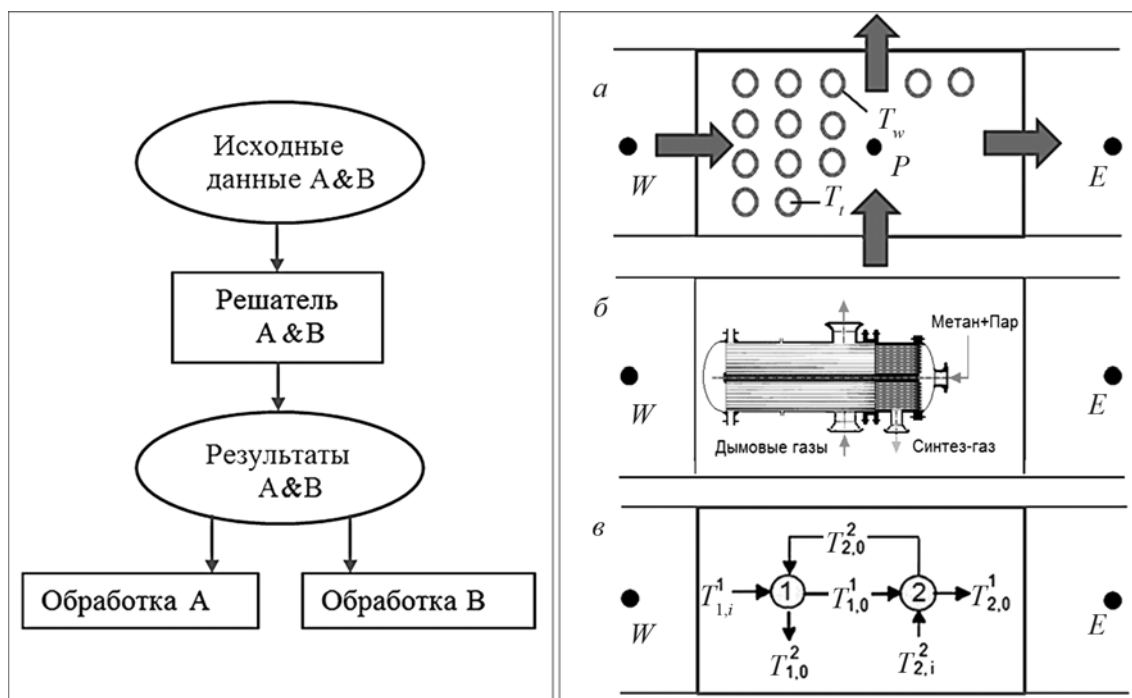


Рис. 4. Моделирование по объединенному алгоритму: структурная и сеточная схемы

В объединенном алгоритме все уравнения разно-масштабных моделей решаются однообразно, едиными методами, с использованием одинаковых процедур и на элементах одной и той же расчетной сетки. При этом модели конструктивных элементов (рис. 4, а), аппаратов в целом (рис. 4, б), и их систем (рис. 4, в) оказываются встроенными внутрь ячеек трехмерных детальных моделей. Их сопряженность, т. е. обратная связь друг с другом, легко достигается подходящей формулировкой членов источников и стоков в рамках единой процедуры решения.

Заключение

Представлен программно-вычислительный комплекс, ориентированный на решение задач, связанных с описанием процесса термохимической регенерации теплоты высокотемпературных газов. Комплекс содержит подпрограммы, моделирующие основные элементы схем энергетических и теплотехнологических установок с термохимической регенерацией тепловых отходов (реактор паровой конверсии, подогреватель парогазовой смеси, испаритель, теплообменные аппараты); модуль расчета теплофизических свойств исходного природного газа и получаемого синтез-газа с учетом их многокомпонентного состава, температуры и давления; модули расчета кинетики химических реакций; модуль расчета излучения.

Объединенные в единый комплекс, модули способны значительно повысить эффективность разработки энергосберегающих технологических схем, выработку рекомендаций по организации технологических процессов и конструкции промышленных агрегатов, в которых может быть успешно применена система термохимической регенерации на основе конверсии природного газа с получением существенной экономии природного газа.

Результаты численных исследований схемных решений систем термохимической регенерации для различных технологий (производства стекла, плавки и нагрева металла, получения электроэнергии для собственных нужд металлургического комбината в газотурбинной установке) показали хорошее совпадение с известными расчетными и экспериментальными литературными данными. Программный комплекс позволяет исследовать влияние конструктивных характеристик аппаратов (в том числе конструкции реакционных элементов, образующих реактор конверсии), а также режимных параметров процесса на степень завершенности конверсии, оценить экономию топлива в технологическом процессе или в процессе выработки электроэнергии.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы» (государственный контракт 16.516.11.6153).

Список литературы

1. **Новосельцев В.Н.** К вопросу о химической регенерации теплоты промышленных огнетехнических установок: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1971.
2. **Шопшин М.Ф.** Исследование реактора-теплообменника паровой конверсии природного газа в системе регенеративного теплоиспользования топливных печей: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1979.
3. **Beerkens R., Muysendberg H.** Comparative Study on Energy-Saving Technologies for Glass Furnaces // *Glastech. Ber.* 1992. V. 65. No. 8. Pp. 216—224.
4. **Носач В.Г.** Энергия топлива. Киев: Наукова думка, 1989.
5. **Шопшин М.Ф. и др.** Химическая регенерация тепловых отходов топливных печей. Сер. «Энерготехнологические процессы в химической промышленности». М.: НИИТЭХИМ, 1981.
6. **Kesser K.F. et al.** Analysis of a Basic Chemically Recuperated Gas Turbine Power Plant // *ASME Journal Eng. for Gas Turbines and Power.* 1994. V. 116. P. 277.
7. **Wen-Ching Yang et al.** Thermal Chemical Recuperation Method and System for Use with Gas Turbine System // *U.S. Patent.* 1997. No. 5. P. 896.
8. **Westinhouse Electric Corporation.** Advanced Natural Gas-Fired Turbine System Utilizing Thermochemical Recuperation and/or Partial Oxidation for Electricity Generation, Greenfield and Repowering Applications. Final Report. Orlando: Florida, 1997.
9. **Крылов А.Н.** Повышение эффективности стекловаренных печей на основе комплексной регенерации тепловых отходов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2007.
10. **Ткач М.Р., Чердиченко А.К.** Эффективность газотурбинной установки с термодинамической и термохимической регенерацией теплоты уходящих газов // *Авиационно-космическая техника и технология.* 2009. № 7 (64). С. 19—22.
11. **Пащенко Д.И.** Повышение энергетической эффективности высокотемпературных теплотехнологических установок за счет термохимической регенерации теплоты: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2011.
12. **Рестрепо Г.А. и др.** Повышение энергоэффективности системы термохимической рекуперации на основе численного моделирования тепломассообменных процессов в ее элементах // *Тепловые процессы в технике.* 2012. № 4. С. 165—171.
13. **Zhubrin S.V.** Computational Model for Performance Predictions in Bayonet-Tube Methane-Steam Reformer [Электрон. ресурс] https://docs.google.com/document/d/129Z9z7yLiQcg_VpSv7IgKXxL2dxO0hiswF5ShkWp3anM/preview?pli=1 (дата обращения 04.06.2017)
14. **Ву Ван Чьен.** Использование труб Фильда в аппаратах системы комплексной утилизации тепловых

отходов высокотемпературных установок: Автореф. дисс. канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2012.

15. **Жубрин С.В. и др.** Модель тепло- и массообмена в камере дожигания с трубами Фильда // Надежность и безопасность энергетики. 2014. № 3 (26). С. 57—65.

16. **Тарарыков А.В., Гаряев А.Б.** Исследование неравновесного характера протекания паровой конверсии метана в процессе термохимической регенерации // Вестник МЭИ. 2015. № 2. С. 62—66.

17. **Zhubrin S.V., Glazov V.S.** Detailed Lumped Model of Bayonet-Tube Methane Steam Reformer [Электрон. ресурс] <http://www.researchgate.net/publication/280599860> (дата обращения 07.05.2017)

18. **Zhubrin S.V., Glazov V.S.** Some Models Predicting ThermoChemical Performance in Tubular Methane Steam Reformers [Электрон. ресурс] <http://www.researchgate.net/publication/280610351> (дата обращения 12.06.2017)

19. **Попов С.К.** Анализ предельного уровня энергосбережения в установках с термохимической регенерацией теплоты // Вестник МЭИ. 2012. № 5. С. 9—13.

20. **Попов С.К., Свистунов И.Н., Гавряшина И.В.** Эффективность применения термохимической регенерации тепловых отходов в промышленных печах // Энергосбережение – теория и практика: Труды VI Междунар. школы-семинара молодых ученых и специалистов. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

21. **Попов С.К., Свистунов И.Н.** Исследование установок с термохимической регенерацией теплоты на основе пароуглекислотной конверсии // Промышленная энергетика. 2013. № 8. С. 28—31.

22. **Попов С.К., Свистунов И.Н., Конопелько Е.Д.** Анализ эффективности термохимической регенерации в высокотемпературных установках // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 3. С. 52—56.

23. **Попов С.К.** Методика оценки эффективности применения термохимической регенерации тепловых отходов // Промышленная энергетика. 2014. № 8. С. 36—40.

References

1. **Novosel'tsev V.N.** K Voprosu o Himicheskoy Regeneratsii Tepla Promyshlennykh Ognetekhnicheskikh Ustanovok: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: MPEI, 1971. (in Russian).

2. **Shopshin M.F.** Issledovanie Reaktora-Teploobmennika Parovoy Konversii Prirodnogo Gaza v Sisteme Regenerativnogo Teploispol'zovaniya Toplivnykh Pechey: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: MPEI, 1979. (in Russian).

3. **Beerkens R., Muysendberg N.** Comparative Study on Energy-Saving Technologies for Glass Furnaces. *Glastech. Ber.* 1992;65;8:216—224.

4. **Nosach V.G.** Energiya Topliva. Kiev: Naukova Dumka, 1989. (in Russian).

5. **Shopshin M.F. i dr.** Himicheskaya Regeneratsiya Teplovykh Othodov Toplivnykh Pechey. Seriya Energotekh-

nologicheskie Protssy v Himicheskoy Promyshlennosti. M.: NIITEKHIM, 1981. (in Russian).

6. **Kesser K.F. et al.** Analysis of a Basic Chemically Recuperated Gas Turbine Power Plant. *ASME Journal Eng. for Gas Turbines and Power.* 1994;116:277.

7. **Wen-Ching Yang et al.** Thermal Chemical Recuperation Method and System for Use with Gas Turbine System. U.S. Patent. 1997;5:896.

8. **Westinhouse Electric Corporation.** Advanced Natural Gas-Fired Turbine System Utilizing Thermochemical Recuperation and/or Partial Oxidation for Electricity Generation, Greenfield and Repowering Applications. final report. Orlando: Florida, 1997.

9. **Krylov A.N.** Povyshenie Effektivnosti Steklovarennykh Pechey na Osnove Kompleksnoy Regeneratsii Teplovykh Othodov: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: MPEI, 2007. (in Russian).

10. **Tkach M.R., Cherednichenko A.K.** Effektivnost' Gazoturbinnoy Ustanovki s Termodynamicheskoy i Termohimicheskoy Regeneratsiyey Tepla Uhodyashchih Gazov. *Aviatsionno-kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya.* 2009;7(64):19—22. (in Russian).

11. **Pashchenko D.I.** Povyshenie Energeticheskoy Effektivnosti Vysokotemperaturnykh Teploekhnologicheskikh Ustanovok za Schet Termohimicheskoy Regeneratsii Teplovykh Othodov: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Saratov: SGTU, 2011. (in Russian).

12. **Restrepo G.A. i dr.** Povyshenie Energoeffektivnosti Sistemy Termohimicheskoy Rekuperatsii na Osnove Chislennogo Modelirovaniya Teploobmennyykh Protssessov v ee Elementah. *Teplovykh Protssy v Tekhnike.* 2012;4:165—171. (in Russian).

13. **Zhubrin S.V.** Computational Model for Performance Predictions in Bayonet-Tube Methane-Steam Reformer. [Elektron. Resurs] <https://docs.google.com/document/d/129Z9z7yLiQcgBpSv7IgKXxL2dxO0hiswF5ShkWp3anM/preview?pli=1> (Data Obrashcheniya 04.06.2017)

14. **Vu Van Ch'en** Ispol'zovanie Trub Fil'da v Apparatah Sistemy Kompleksnoy Utilizatsii Teplovykh Othodov Vysokotemperaturnykh Ustanovok: Avtoref. Dis. Kand. Tekhn. Nauk. M.: NRU «MPEI», 2012. (in Russian).

15. **Zhubrin S.V. i dr.** Model' Teplo- i Massoobmena v Kamere Dozhiganiya s Trubami Fil'da. *Nadezhnost' i Bezopasnost' Energetiki.* 2014; 3 (26):57—65. (in Russian).

16. **Tararykov A.V., Garyaev A.B.** Issledovanie Neravnovesnogo Haraktera Prottekaniya Parovoy Konversii Metana v Protssesse Termohimicheskoy Regeneratsii. *MPEI Vestnik.* 2015;2:62—66. (in Russian).

17. **Zhubrin S.V., Glazov V.S.** Detailed Lumped Model of Bayonet-Tube Methane Steam Reformer. [Elektron. Resurs] <http://www.researchgate.net/publication/280599860> (Data Obrashcheniya 07.05.2017)

18. **Zhubrin S.V., Glazov V.S.** Some Models Predicting ThermoChemical Performance in Tubular Methane Steam Reformers [Elektron. Resurs] <http://www.researchgate.net/publication/280610351> (Data Obrashcheniya 12.06.2017)

19. **Popov S.K.** Analiz Predel'nogo Urovnya Energoberezheniya v Ustanovkakh s Termohimicheskoy Regeneratsiyey Teplooty. MPEI Vestnik. 2012;5:9—13. (in Russian).

20. **Popov S.K., Svistunov I.N., Gavryashina I.V.** Effektivnost' Primeneniya Termohimicheskoy Regeneratsii Teplovyh Othodov v Promyshlennyh Pechah. Energoberezhenie—Teoriya i Praktika: Trudy VI Mezhdunar. Shkoly-seminara Molodyh Uchenykh i Spetsialistov. M.: Izdatel'skiy dom MPEI, 2012. (in Russian).

21. **Popov S.K., Svistunov I.N.** Issledovanie Ustanovok s Termohimicheskoy Regeneratsiyey Teplooty na Osnove Paroglekislотноy Konversii. Promyshlennaya Energetika. 2013;8:28—31. (in Russian).

22. **Popov S.K., Svistunov I.N., Konopel'ko E.D.** Analiz Effektivnosti Termohimicheskoy Regeneratsii v Vysokotemperaturnykh Ustanovkakh. Energoberezhenie i Vodopodgotovka. 2014;3:52—56. (in Russian).

23. **Popov S.K.** Metodika Otsenki Effektivnosti Primeneniya Termohimicheskoy Regeneratsii Teplovyh Othodov. Promyshlennaya Energetika. 2014;8:36—40. (in Russian).

Сведения об авторах

Гаряев Андрей Борисович — доктор технических наук, заведующий кафедрой теплообменных процессов и установок НИУ «МЭИ», e-mail: gab874@yandex.ru

Глазов Василий Степанович — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ка-

федры теплообменных процессов и установок НИУ «МЭИ», e-mail: mamurik@bk.ru

Жубрин Сергей Викторович — кандидат технических наук, приглашенный профессор Кингстонского университета, e-mail: s.zhubrin@kingston.ac.uk

Попов Станислав Константинович — доктор технических наук, профессор кафедры энергетики высокотемпературной технологии НИУ «МЭИ», e-mail: PopovSK@mpei.ru

Information about authors

Garyaev Andrey B. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Heat-and-Mass Exchange Processes and Installations Dept., NRU MPEI, e-mail: gab874@yandex.ru

Glazov Vasily S. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor, Leading Researcher of Heat-and-Mass Exchange Processes and Installations Dept., NRU MPEI, e-mail: mamurik@bk.ru

Zhubrin Sergey V. — Ph.D. (Techn.), Visiting Professor of Kingston University London, e-mail: s.zhubrin@kingston.ac.uk

Popov Stanislav K. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Energetic of High-Temperature Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: PopovSK@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 23.11.2016