

© А. А. ОЛЕННИКОВ,¹ Е. А. ОЛЕННИКОВ,² А. А. ЗАХАРОВ³

¹Сибирский государственный индустриальный университет

^{2,3}Тюменский государственный университет

¹oaa@cirkul-m.ru, ²olennikov@utmn.ru

УДК 669:519.6

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СХЕМ
УТИЛИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
ОТ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ**

**SOFTWARE FOR DISPOSAL CIRCUIT SIMULATION
OF PHYSICAL AND CHEMICAL ENERGY FROM
THE EXHAUST GASES OF METALLURGICAL UNITS**

Металлургическая и энергетическая отрасли являются самыми крупными потребителями органического топлива. Доля затрат на топливно-энергетические ресурсы в общих заводских затратах на производство продукции составляет более 30%. Учитывая, что с каждым днем дорожает добыча и переработка топлива и истощаются мировые запасы, проблемы энергоресурсосбережения ставятся на одно из первых мест. Реальным направлением развития восточных районов страны является создание региональной металлургии и в России. К этой мысли постепенно приходят и потребители металла. В связи с этим в России стали возникать карликовые мини-заводы, ориентированные на высочайшее качество выпускаемой основной продукции, а также максимизацию использования энергии исходного топлива. При проектировании вновь создаваемых или модернизации существующих металлургических агрегатов возникает потребность в емких расчетах, связанных с конструированием, теплообменом, газодинамикой и т. д. Для решения этих задач учеными СибГИУ, г. Новокузнецк разработаны математические модели, алгоритмы и программный комплекс, представленные в этой работе.

Metallurgical and power industries are the largest consumers of fossil fuels. The share of the costs of fuel and energy resources in the total factory cost of production is more than 30%. Given that every day becomes more expensive extraction and processing of fuel and depleted world reserves, the problems of energy saving is placed on one of the first places. The real direction of development of the eastern regions of the country is the creation of a regional industry in Russia. This idea is gradually coming to metal consumers. In this regard, Russia is beginning to build mini-dwarf plants focused on the highest quality of the main products, as well as maximizing the energy source of fuel. When designing new or modernizing the existing metallurgical units one should take into account the need in the intensive calculations associated with the construction, heat exchangers, gas dynamics, etc. To meet these challenges,

scientists of SibSIU from Novokuznetsk have worked out mathematical models, algorithms and software system that are presented in this work.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Сложный теплообмен, математическая модель, коэффициент полезного теплоиспользования, утилизация тепла.

KEY WORDS. Complex heat transfer, mathematical model, use of heat efficiency, heat recovery.

В металлургическом процессе коэффициент полезного действия всего цикла составляет порядка 20%. Часть энергии расходуется на протекание процесса в основном технологическом агрегате. Около 20-30% энергии уходит на тепловые потери через стенки агрегата, гарнисажное охлаждение и 40-50% теряется с отходящими газами [1; 2].

Учитывая, что с каждым днем дорожает добыча и переработка топлива, и истощаются мировые запасы, проблемы энергоресурсосбережения ставятся на одно из первых мест. Необходимо все шире внедрять энергосберегающие технологии. Поэтому наиболее рациональным вариантом является создание энергометаллургического комплекса, в основу которого положено два подхода к использованию энергии. Речь идет о физической и химической регенерации тепловой энергии.

Первый подход основан на утилизации тепловой энергии энергетическими установками: котлами-утилизаторами, системами гарнисажного охлаждения, установками подогрева топлива. В зависимости от мощности металлургического агрегата, полученная тепловая энергия в первых двух установках, в среднем от 2 МВт до 15 МВт, может использоваться для отопления производственных цехов. Включение к котлу-утилизатору паровой турбины позволит получить от 50 до 420 кВт электрической энергии. Такой подход позволит снизить нагрузку на котельную или ТЭЦ предприятия, а утилизация энергии отходящих газов составит около 70-85%.

Второй подход основан на использовании химического потенциала отходящего газа с последующим получением моторного топлива. Этот процесс состоит из следующих стадий: сначала отходящий газ попадает в реформер, затем проходит сероочистку, осуществляется каталитический синтез, где вырабатывается синтез-газ. Полученный газ с объемным отношением CO/H_2 , близким к 1/1 может использоваться и как энергетическое топливо и как сырье для получения синтетического топлива. Такой вариант утилизации позволяет использовать всю физическую и химическую энергию отходящего газа с эффективностью до 98% энергоиспользования. Такая технология позволит создать полностью бездымный процесс.

Выполнить проект любого варианта утилизации энергии отходящих газов, основанного на одном из подходов, — весьма не простая задача. Необходимо знать цели использования утилизируемых вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), а также выполнить емкие расчеты. Перспективным способом решения этой задачи является моделирование процессов теплообмена, газодинамики на

ЭВМ, что позволяет существенно сократить трудоемкость и избежать многих ошибок при проектировании и оценки.

При разработке моделей, используемых в программном комплексе, рассматривался подход к моделированию сложных систем. В основу закладывается поэлементно-физическая постановка задачи, анализ и синтез системы по ее отдельным составным частям. Этот подход носит название «метод прямой аналогии» [3; 4].

Адекватность построенных таким образом сложных моделей базируется на дополнительном положении о подобии сложных систем, сформулированном В. А. Вениковым в развитии первой теории подобия [4].

В рассматриваемой работе мы имеем дело, по крайней мере, с тремя уровнями сложных систем, собираемых из подсистем.

Первый уровень: процессы в отдельных конструктивных элементах теплоиспользующих агрегатов (пучках труб, соединительных каналах и т. д.). Здесь в качестве элементарных систем рассматриваются процессы сложного теплообмена между теплопринимающими элементами и средами, процессы трения газа о стенки и т. п., которые описываются фундаментальными физическими законами, справедливость этих законов считается доказанной, а конечный результат зависит от используемых сочетаний и соединений.

Второй уровень: теплоутилизирующие агрегаты в целом. Они состоят из описанных выше конструктивных элементов. И следовательно, вид сложной системы этого (второго) уровня зависит от сочетания и способа соединения отдельных конструктивных элементов (систем первого уровня). Примерами сложных систем второго уровня являются: котлы-утилизаторы, газовые турбины, агрегаты кипящего слоя и т. п. [5-8].

К этому уровню относятся модели сложного теплообмена в котлах-утилизаторах [9]:

Для коридорного пучка

$$\alpha_K = 0,2C_s C_z \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{\nu} \right)^{0,65} Pr^{0,33} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\alpha_3 + 1}{2} a T^3 \frac{1 - \left(\frac{T_3}{T} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_3}{T}},$$

где C_s — поправка на геометрическую компоновку пучка; определяется в зависимости от относительного шага труб; C_z — поправка на число рядов труб по ходу газов; определяется в зависимости от среднего числа рядов в отдельных пакетах рассчитываемого пучка; λ — коэффициент теплопроводности материала пучка труб; d — диаметр пучка труб; w — скорость газового потока; ν — коэффициент кинематической вязкости текущей среды; Pr — число Прандтля; α_3 — степень черноты загрязненных стенок лучеиспускающих поверхностей; a — степень черноты потока газов в зависимости от температуры; T , T_3 — температура газов и наружной поверхности стенки с учетом загрязнений.

Для шахматного пучка

$$\alpha_{Ш} = 0,36 C_s C_z \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{\nu} \right)^{0,6} \text{Pr}^{0,33} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\alpha_3 + 1}{2} a T^3 \frac{1 - \left(\frac{T_3}{T} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_3}{T}}.$$

Модель для определения потерь давления на трение с учетом транспортировки газа под повышенным давлением:

$$\Delta P = P_{CT1} - P_{CT2} = P_{CT1} - \left[P_{CT1}^2 - \left(\lambda \frac{l}{d_{\text{эКВ}}} \cdot \frac{\rho w^2}{2} \cdot \frac{2PT_{CT}}{T} \right) \right]^{0,5},$$

где P_{CT1} , P_{CT2} — соответственно давление газа в начале и в конце участка газопровода; l — длина рассматриваемого газохода; $d_{\text{эКВ}}$ — эквивалентный диаметр канала для прохода отходящего газа; ρ — плотность перемещаемого газа; T_{CT} , T — соответственно средняя в пределах рассчитываемого участка газового канала температура стенки и отходящего газа.

Третий уровень составляют комбинации описанных выше агрегатов, их набор осуществляют по критерию полезного теплоиспользования, который определяется после расчетов теплоиспользующих установок, включенных в газовый тракт и выявления их частных коэффициентов использования тепловой энергии, следующим образом [10; 11]:

$$\sum \eta_{\text{КПД}} = \eta_{\text{АГР}}^{\text{ИСП}} + \eta_{\text{ГО}}^{\text{ИСП}} \cdot \eta_{\text{ГО}}^{\text{КПД}} + \eta_{\text{У1}}^{\text{ИСП}} \cdot \eta_{\text{У1}}^{\text{КПД}} + \eta_{\text{У2}}^{\text{ИСП}} \cdot \eta_{\text{У2}}^{\text{КПД}} + \dots + \eta_{\text{УN}}^{\text{ИСП}} \cdot \eta_{\text{УN}}^{\text{КПД}},$$

где $\eta_{\text{АГР}}^{\text{ИСП}}$, $\eta_{\text{ГО}}^{\text{ИСП}}$, $\eta_{\text{У1}}^{\text{ИСП}}$, $\eta_{\text{У2}}^{\text{ИСП}}$, $\eta_{\text{УN}}^{\text{ИСП}}$ — соответственно, коэффициенты теплоиспользования металлургического агрегата, гарнисажного охлаждения и последовательно соединенных энергоутилизаторов и газоочистных систем; $\eta_{\text{ГО}}^{\text{КПД}}$, $\eta_{\text{У1}}^{\text{КПД}}$, $\eta_{\text{У2}}^{\text{КПД}}$, $\eta_{\text{УN}}^{\text{КПД}}$ — соответственно, коэффициенты полезного действия системы гарнисажного охлаждения, теплоутилизаторов и газоочистных систем.

Таким образом, при последовательном применении указанного дополнительного положения адекватность получаемых сложных систем из подсистем нижнего уровня (прежде всего качественную) можно считать доказанной. Настройка же конкретных параметров, особенно для агрегатов второго уровня, естественно возникнет, но только после реализации проектных решений.

На основе представленных моделей создан и в настоящее время активно развивается программный продукт SKV_SAPR, разработанный с использованием объектно-ориентированного подхода [12; 13], а также технологии многопоточных приложений.

В задачу программного продукта входит: компоновка схемы утилизации энергии отходящих газов; конструктивный расчет теплоэнергетических установок, используемых в схеме; расчет количества тепла, воспринятого установ-

ками энергоутилизации; оценка потерь давления по газовому тракту, включая энергоутилизаторы; расчет физических параметров отходящих газов на каждом участке газового тракта; поиск оптимального варианта теплоэнергетической установки и всей схемы с участием эксперта; выдача технической документации и рекомендаций по проектированию.

На рис. 1 представлена структура программного комплекса. На начальном этапе моделирования задаются технические условия и выходные параметры отходящего газа металлургического агрегата: состав, расход, давление, температура. В соответствии с названием проекта создаются рабочие файлы и формируются пути к ним.

Далее выполняется компоновка схемы энергоутилизации, при этом возможно обращение к базе данных с целью выбора предлагаемого варианта, рассчитанного ранее, либо конструирования нового. Далее вычисляются термодинамические параметры отходящего газа на основе известных термодинамических законов и приступают к описанию и вводу необходимых данных для теплоэнергетических установок. При этом возможно обращение к расширяемым базам данных, которые разработаны в среде Microsoft Access [14; 15] и содержат нормативную, конструкторскую, теплофизическую и энергетическую документацию стандартных моделей, предлагаемых заводом-изготовителем, либо сконструированных самостоятельно. По завершению ввода данных выполняются расчеты и выводятся результаты по текущей установке по ходу движения газов.

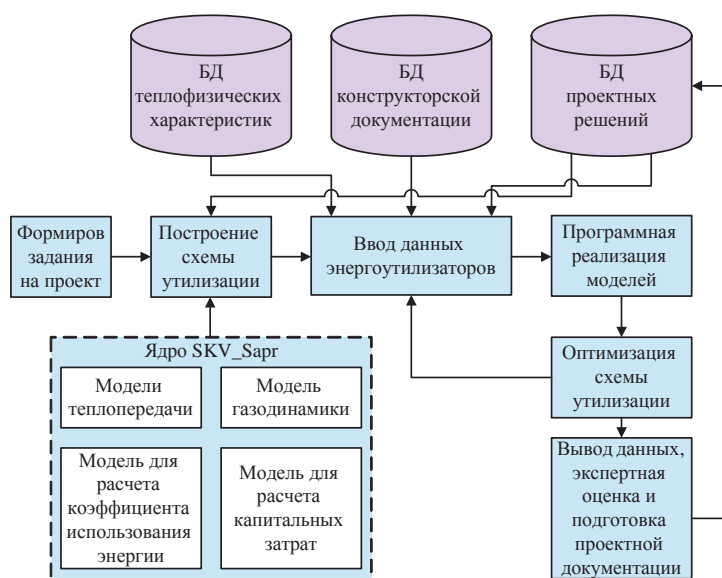


Рис. 1. Структура комплекса SKV_SAPR

По завершению работы над последним энергоутилизатором, находящимся в схеме, выполняется расчет, по результатам которого определяют окончательные конструкторские параметры установок, возможное усвоение ими тепловой энергии, потери давления на каждом участке схемы, определение термодина-

мических параметров газа и его калорийности. Если же проектом предполагается выбрать эффективный вариант из набора схем утилизации энергии, тогда выполняется анализ по сквозному коэффициенту использования тепловой энергии. Полученные результаты оцениваются экспертом, если вносятся необходимые изменения в конфигурации установки и выполняются перерасчеты.

Ниже приведен фрагмент расчета программного комплекса. На рис. 2 и 3 рассмотрено три возможных схемы энергоутилизации, представлены графические зависимости потерь давления и утилизируемой тепловой энергии (при различных конструктивных параметрах систем энергоутилизации, газоочистки, узлов сопротивлений и каналов).

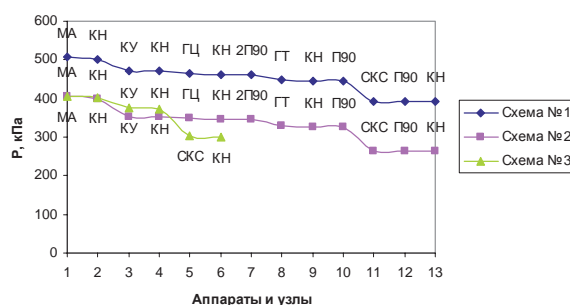


Рис. 2. Падение давления в установках энергоутилизации, систем газоочистки, узлах сопротивлений и каналов.

МА — металлургический агрегат; КН — канал; КУ — котел-утилизатор; ГЦ — группа циклонов; П90 — поворот на 90°; ГТ — газовая турбина; СКС — сушило кипящего слоя

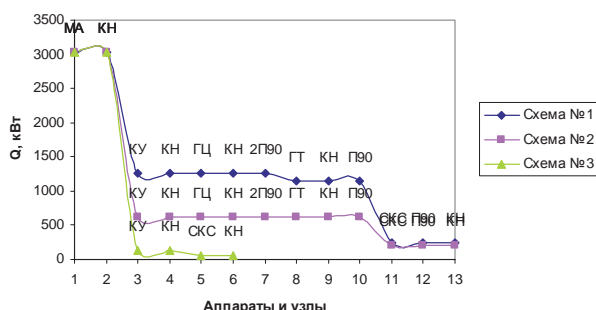


Рис. 3. Тепловая энергия, полезно использованная утилизаторами

Таким образом, использование данного программного комплекса позволяет конструировать схемы энергоутилизации, выполнять расчеты и выбирать оптимальный вариант по коэффициенту сквозного теплоиспользования, а также исследовать влияние основных режимных параметров.

Предложенные модели и программный комплекс прошли апробацию в ОАО «Сибирский Сантех Проект», г. Новокузнецка. Полученные данные были сопоставлены со сторонними программными продуктами и имеют положительные отзывы проектировщиков, работающих в теплотехнической области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курунов И. Ф., Савчук Н. А. Состояние и перспективы бездоменной металлургии железа. М.: Черметинформация, 2002. 198 с.
2. Цымбал В. П., Мочалов С. П., Калашников С. Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях. В 3-х ч.: Ч. I. Термодинамический подход к самоорганизации: учеб. пособие / под ред. В. П. Цымбала; СибГИУ. Новокузнецк, 2004. 180 с.
3. Цымбал В. П., Мочалов С. П., Рыбенко И. А. и др. Процесс СЭР — металлургический струйно-эмульсионный реактор. М.: Metallurgizdat, 2014. 488 с.
4. Тетельбаум И. М., Тетельбаум Я. И. Модели прямой аналогии. М.: Наука, 1979. 834 с.
5. Войнов А. П., Зайцев В. А., Куперман Л. И. и др. Котлы-утилизаторы и энерго-технологические агрегаты. М.: Энергоиздат, 1989. 272 с.
6. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: Энергия, 1977. 344 с.
7. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972. 341 с.
8. Оленников А. А. Математическая и физическая модели котла-утилизатора и агрегата кипящего слоя применительно к струйно-эмульсионному реактору типа СЭР / А. А. Оленников, В. П. Цымбал // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2009. № 8. С. 43-51.
9. Оленников А. А. Математическая модель и алгоритм расчета котла-утилизатора, работающего на вторичных энергоресурсах агрегатов жидкофазного восстановления // IX Международная научно-практическая конференция: Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах. Пенза: ПДЗ, 2008. С. 277-279.
10. Оленников А. А. Варианты и оценка эффективности использования вторичных энергоресурсов для агрегатов жидкофазного восстановления / А. А. Оленников, В. П. Цымбал // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2008. № 6. С. 43-51.
11. Оленников А. А. Комплекс моделей и программ для оптимизации вторичной энергии металлургических процессов прямого восстановления / А. А. Оленников, В. П. Цымбал // Творческое наследие Б. И. Китаева: труды междунар. науч.-практ. конф. 11-14 февраля 2009 г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. С. 232-236.
12. Осипов Д. Delphi. Профессиональное программирование. М.: Символ, 2006. 1055 с.
13. Бакнелл Д. Фундаментальные алгоритмы и структуры данных в Delphi. М.: Diasoft, 2006. 556 с.
14. Кузнецов А. Microsoft Access: учебный курс. СПб.: Питер, 2006. 364 с.
15. Ефремова Л. И., Глухова Т. В. Проектирование баз данных в среде СУБД MS Access: учеб. пособие. Саранск: Изд-во СВМО, 2008. 121 с.

REFERENCES

1. Kurunov, I. F., Savchuk, N. A. Status and prospects of direct reduction metallurgy of iron. M.: Chermetinformatiya, 2002.
2. Tsybal, V. P., Motchalov, S. P., Kalashnikov, S. P. Models and mechanisms of self-organization in engineering and technology. In 3: Part I. Thermodynamic approach to self-Proc. allowance. SibGIU. Novokuznetsk, 2004. 180 p.
3. Tsybal, V. P., Motchalov, S. P., Rybenko, I. A. and others. The process of SER — Metallurgical spray emulsion reactor. M.: Metallurgy, 2014. 488 p.

4. Tetelbaum, I. M., Tetelbaum, Y. I, Frenkel Models direct analogy. M.: Nauka, 1979. 834 p.
5. Voinov, A. P., Zaitsev, V. A. Kuperman, L. I. and others. Boilers waste heat recovery units. M.: Energoizdat, 1989. 272 p.
6. Mikheev, M. A., Mikheev, I. M. Fundamentals of heat transfer. Ed. 2nd stereotype. M.: Energy, 1977. 344 p.
7. Kutateladze, S. S., Leontyev, A. I. Heat and mass transfer and friction in the turbulent boundary layer. M.: Energy, 1972. 341 p.
8. Olennikov, A. A. The mathematical and physical model of the recovery boiler and the fluidized bed unit in relation to the emulsion spray-type reactor SER. // Math. Universities. Cher. Metallurgy. 2009. № 8. Pp. 43-51.
9. Olennikov, A. A. Mathematical model and calculation algorithm of the recovery boiler operating at liquid-phase waste energy recovery units. // IX International scientific-practical conference: Problems of energy conservation and ecology in the industrial and housing complexes. Penza: ETC, 2008. Pp. 277-279.
10. Olennikov, A. A., Tsymbal, V. P. Options and performance evaluation of the use of secondary energy for the liquid-phase recovery units // Math. Universities. Cher. Metallurgy. 2008. № 6. Pp. 43-51.
11. Olennikov, A. A., Tsymbal, V. P. Complex models and programs for energy optimization secondary metallurgical processes of direct reduction // B. I. Kitaeva: Proceedings Intern. scientific and practical. Conf. 11-14 February 2009 Ekaterinburg: Ural State Technical University, 2009. Pp. 232-236.
12. Osipov, D. Delphi. Professional programming. M.: Symbol, 2006. 1055 p.
13. Bucknell, D. Fundamental algorithms and data structures in Delphi. M.: Diasoft, 2006. 556 p.
14. Kuznetsov, A. Microsoft Access: a training course. SPb.: Peter, 2006. 364 p.
15. Efremova, L. I., T. Glukhova, T. V. Database design environment DBMS MS Access: Textbook. Saransk: Univ MTBF, 2008. 121 p.

Авторы публикации

Оленников Алексей Александрович — доцент кафедры теплогазоводоснабжения, водоотведения и вентиляции (основное место работы); доцент кафедры прикладных информационных технологий и программирования (по совместительству) Сибирского государственного индустриального университета (г. Новокузнецк), кандидат технических наук

Оленников Евгений Александрович — доцент кафедры информационной безопасности Тюменского государственного университета, кандидат технических наук

Захаров Александр Анатольевич — зав. кафедрой информационной безопасности Тюменского государственного университета, доктор технических наук

Authors of the publication

Alexey A. Olennikov — Cand. of Tech. Sciences, associate professor, Applied Information Technologies and programming, Syberian State Industrial University

Evgeniy A. Olennikov — Cand. of Tech. Sciences, associate professor, IT-security Department, Tyumen State University

Alexandr A. Zaharov — Doctor of Tech. Sciences, Head of IT-security department, Tyumen State University