

Для цитирования

Попов Д. И. Математическое моделирование физических процессов в испытательных комплексах электрических ма-

Статья поступила в редакцию 18.05.2018 г.  
© Д. И. Попов

УДК 662.925.6  
DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-84-87

**Е. М. РЕЗАНОВ**

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕРМОМАСЛОГРЕЙНЫХ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Рассмотрены преимущества тепловой работы термомаслогрейных котлов. Предложен алгоритм определения оптимальной температуры подогрева воздуха, необходимого для горения топлива в котлоагрегатах нефтехимического производства, исходя из минимума суммарных дисконтированных затрат на рекуперативное устройство и сжигаемое топливо.

Обоснована целесообразность использования разработанного алгоритма, что позволяет снизить расход топлива, повысить коэффициент полезного действия термомаслогрейного котельного агрегата.

**Ключевые слова:** эффективность, затраты, воздух, теплопередача, топливо, котельный агрегат, температура.

Наиболее актуальным направлением сегодня в нефтехимической промышленности является сбережение топливно-энергетических ресурсов. Создание современных котельных агрегатов, которые соответствуют технико-экономическим и экологическим показателям, является главным техническим направлением отрасли.

Одним из решений, которое соответствует безопасности, и эффективности нефтехимического производства стало инновационное направление в России по проектированию и исследованию котлоагрегата с использованием в качестве теплоносителя диатермического масла. Сегодня термомаслогрейные котельные агрегаты считаются инновационным вариантом получения тепловой энергии в сфере производства нефтехимии и добычи нефти. Уникальность данного оборудования заключается в том, что можно получить высокие температуры теплоносителя (диатермического масла до + 350 °С) при относительно низких показателях давления 2–5 бар. Именно данный критерий способствует снижению стоимости рассматриваемого оборудования и повышению уровня безопасности его работы [1].

В исследуемых установках с использованием высокотемпературного теплоносителя имеется ряд преимуществ [2, 3]: возможность получения высоких температур при низких давлениях; отсутствует водоподготовка, так как не используется вода; теплоноситель не замерзает; эксплуатация котельного

агрегата осуществляется автоматически; исключена коррозия и эрозия металлов. Но, как и в обычных котельных установках, греющей средой является тепловая энергия сжигающего топлива.

Эффективность сжигания топлива в высокотемпературных теплотехнологических агрегатах повышается при сочетании полного его сгорания при минимальном избытке воздуха с возможно более полной утилизацией тепловой энергии уходящих газов. Использование физической теплоты отходящих газов для подогрева воздуха является основным мероприятием повышения коэффициента полезного действия, снижения расхода сжигаемого топлива и улучшения экологических показателей [4–6]. Но при этом увеличивается поверхность нагрева рекуперативного устройства (рис. 1). Это приводит к дополнительным затратам на утилизирующий тепловую энергию аппарат. Поэтому необходимо определять оптимальную температуру подогрева воздуха, идущего для горения сжигаемого топлива в топке котла.

Для решения задачи определения оптимальной температуры подогрева воздуха, необходимого для горения сжигаемого топлива в термомаслогрейных котельных агрегатах, мною был разработан алгоритм утилизации тепловой энергии уходящих газов.

Алгоритм разработан на основании нормативного метода теплового расчета котлов, современного решения уравнений теплообмена и баланса теплоты, экономических показателей [7–11]:

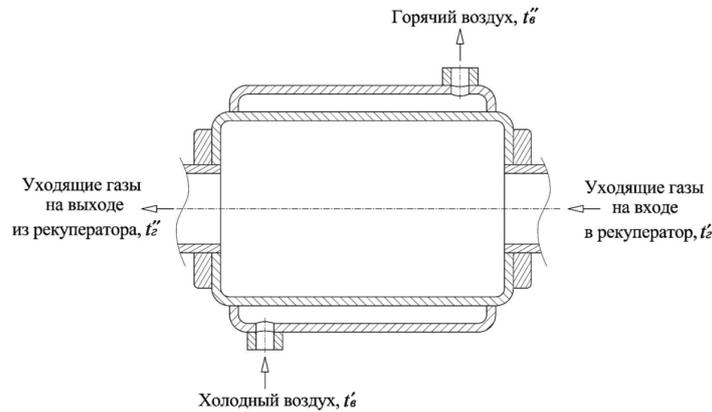


Рис. 1. Продольный разрез рекуперативного устройства

$$\frac{dZ}{dt''_B} = C_m \frac{dB}{dt''_B} + C_p \frac{dF}{dt''_B} = 0, \quad (1)$$

$$C_m = P_m \cdot h, \quad (2)$$

$$C_p = P_p (P_n + \Pi) + \Delta N_{m.g.} [Z \cdot C_{m.g.} (P_n + \Pi) + C_3 \cdot h], \quad (3)$$

$$B = \frac{Q_n + Q_{кл} + Q_{охл} + Q_{изл} + Q_{ак} + Q_{шл} - Q_{экс}}{Q_n^p (1 - R_2) + C'_m \cdot t'_m - V_r (C_r \cdot t_r + R_1) + V_b \cdot C''_B (t''_B - \delta t_B)}, \quad (4)$$

$$F = \frac{B \cdot \eta_B \cdot V_B (C''_B \cdot t''_B - C'_B \cdot t'_B)}{K \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot \nu}, \quad (5)$$

$$t_{b.onm} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a \cdot d}}{2a}, \quad (6)$$

$$a = C_p \cdot \eta_B \cdot C''_B \cdot V_B \cdot c_2 - K \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot C''_B \cdot C_m \cdot c_2^2, \quad (7)$$

$$b = 2 \left( \frac{K \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot C_m \cdot c_1 - C_p \cdot \eta_B \cdot C'_B \cdot t'_B \cdot V_B}{-C_p \cdot \eta_B \cdot C''_B \cdot V_B} \right) C''_B \cdot c_2, \quad (8)$$

$$d = C_p \cdot \eta_B (C''_B \cdot b_1 \cdot c_1 + C'_B \cdot t'_B (C''_B \cdot V_B \cdot c_1 - c_2 \cdot b_1)) - K \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot C''_B \cdot C_m \cdot c_1^2, \quad (9)$$

$$b_1 = Q_n^p (1 - R_2) + C'_m \cdot t'_m - C_r \cdot t_r \cdot V_r - V_r \cdot R_1 - V_b \cdot C''_B \cdot \delta t_B, \quad (10)$$

$$c_1 = \left( A \cdot \frac{C'_r}{C''_r} + B \right) t'_r + \left( \frac{V_b \cdot \eta_B \cdot C'_B}{m \cdot V_r \cdot \eta_r \cdot C''_r (1 + \Theta)} - 1 \right) A \cdot t'_B, \quad (11)$$

$$c_2 = \frac{A \cdot V_b \cdot \eta_B \cdot C''_B}{m \cdot V_r \cdot \eta_r \cdot C''_r (1 + \Theta)} + B, \quad (12)$$

$$t'_r = \frac{C_r \cdot t_r + \Theta \cdot C'_B \cdot t'_B}{(1 + \Theta) C'_r} - \delta t_r, \quad (13)$$

$$t''_r = \frac{C'_r}{C''_r} \cdot t'_r - \frac{V_b \cdot \eta_B (C''_B \cdot t''_B - C'_B \cdot t'_B)}{m \cdot V_r \cdot \eta_r \cdot C''_r (1 + \Theta)}, \quad (14)$$

где  $Z$  — суммарные дисконтированные затраты по рекуперативному устройству и расходу сжигаемого топлива, руб/год;  $C_m$  — годовая стоимость сжигаемого топлива, (руб·с/м<sup>3</sup>·год);  $C_p$  — годовые затраты 1 м<sup>2</sup> поверхности нагрева рекуперативного устройства, руб/(м<sup>2</sup>·год);  $B$  — расход сжигаемого топлива, м<sup>3</sup>/с;  $F$  — поверхность нагрева рекуперативного устройства, м<sup>2</sup>;  $t''_B$  — температура воздуха, идущая на горение сжигаемого топлива, °С;  $P_m$  — суммарная стоимость 1 м<sup>3</sup> натурального топлива, руб/м<sup>3</sup>;  $h$  — время работы котельного агрегата в течение года, с/год;  $P_p$  — суммарные капитальные вложения в сооружение 1 м<sup>2</sup> поверхности нагрева рекуперативного устройства, руб/м<sup>2</sup>;  $P_n$  — норма дисконтирования инвестиций, 1/год;  $\Pi$  — норма амортизационных отчислений, 1/год;  $\Delta N_{m.g.}$  — мощность, затрачиваемая на обслуживание 1 м<sup>2</sup> поверхности нагрева рекуперативного устройства, Вт/м<sup>2</sup>;  $Z$  — коэффициент запаса, включающий резерв по расходу и давлению тягодутьевых машин и мощности электродвигателя;  $C_{m.g.}$  — стоимость тягодутьевых машин, руб./Вт;  $C_3$  — стоимость электроэнергии, руб./(Вт·с);  $Q_n$  — тепловая энергия, полученная в котельном агрегате, Вт;  $Q_{охл}$  — потери тепловой энергии водоохлаждаемыми элементами, Вт;  $Q_{кл}$  — потери тепловой энергии теплопроводностью через обмуровку и обшивку котельного агрегата, Вт;  $Q_{изл}$  — потери тепловой энергии излучением через открытые окна и щели, Вт;  $Q_{ак}$  — потери тепловой энергии на аккумуляцию обмуровки и обшивкой при выводе котельного агрегата из холодного состояния после длительного простоя на стационарный температурный режим, Вт;  $Q_{шл}$  — потери тепловой энергии с уходящим теплом шлака, Вт;  $Q_{экс}$  — тепловая энергия экзотермических реакций, Вт;  $Q_n^p$  — низшая теплота сгорания сжигаемого топлива, Дж/кг;  $R_2$  — доля потерь от механической неполноты сгорания сжигаемого топлива;  $C'_m, t'_m$  — средняя теплоемкость и температура сжигаемого топлива, Дж/(м<sup>3</sup>·К), °С;  $V_r$  — количество дымовых газов на единицу количества сжигаемого топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $t'_r, C'_r$  — температура и средняя теплоемкость уходящих из котельного агрегата газов, °С, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $R_1$  — тепловая энергия несгоревшего СО в уходящих газах, Дж/м<sup>3</sup>;  $V_b$  — количество воздуха, необходимое для сжигания единицы количества топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\delta_{тв}$  — падение температуры воздуха на пути от рекуперативного устройства до горелочных устройств котельного агрегата вследствие потерь тепловой энергии в окружающую среду, °С;  $C''_B, t''_B$  — средняя теплоемкость и температура

воздуха на выходе из рекуперативного устройства, Дж/(м<sup>3</sup>·К), °С;  $\eta_b$  — коэффициент, учитывающий потери воздуха в рекуперативном устройстве;  $C'_b, t'_b$  — средняя теплоемкость и температура воздуха на входе в рекуперативное устройство, Дж/(м<sup>3</sup>·К), °С;  $K$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\varepsilon_{\Delta t}$  — поправочный коэффициент при сложной схеме теплообмена;  $\nu$  — средний температурный напор, °С;  $t_{в.опт}$  — оптимальная температура подогрева воздуха, необходимая для горения топлива в котельном агрегате, °С;  $a, b, d, b_1, c_1, c_2$  — комплексы величин, учитывающие теплофизические, теплотехнические, эксплуатационные и стоимостные характеристики режимных параметров тепловой работы термомаслогрейного котельного агрегата и рекуперативного устройства;  $C'_r, C''_r$  — средние теплоемкости газов на входе и выходе из рекуперативного устройства, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $\delta_r$  — падение температуры газов на пути до рекуперативного устройства вследствие потерь тепловой энергии в окружающую среду, °С;  $A$  и  $B$  — коэффициенты, зависящие от соотношения  $(t''_r - t'_r)/(t'_r - t''_r)$ ;  $t'_r, t''_r$  — температура газов на входе и выходе из рекуперативного устройства, °С;  $m$  — коэффициент, учитывающий выбивание продуктов сгорания из газохода;  $\Theta$  — коэффициент, учитывающий разбавление уходящих газов воздухом на пути до рекуперативного устройства;  $\eta_r$  — коэффициент, учитывающий тепловые потери через ограждающие стенки рекуперативного устройства в окружающую среду.

Рассмотрим тепловую работу термомаслогрейного котельного агрегата на примере Lavart 500 DMH (рис. 2) производства закрытого акционерного общества «Омский завод инновационных технологий» [12], предназначенного для генерации тепловой энергии посредством нагрева высокотемпературного теплоносителя (диатермического масла) продуктами сгорания топлива. Максимальная мощность 0,5 МВт, рабочая температура диатермического масла до 300 °С и перепад температуры (разница температуры между подающей и обратной линии) до 40 °С, температура воздуха идущего на горение топлива 30 °С, температура уходящих газов 337 °С, расход топлива 0,016 м<sup>3</sup>/с, коэффициент полезного действия 86,4 % (при сжигании природного газа с низшей теплотой сгорания 35,9 МДж/м<sup>3</sup>). Поверхности теплообмена представляют собой концентрическую спираль, состоящую из двух колец, свитых из одной или нескольких стальных бесшовных труб. Первое кольцо спирали составляет топку котла. Второе кольцо спирали образует проточные каналы для дымовых газов. Змеевики расположены в герметичной металлической камере (обечайке), которая является корпусом нагревателя.

При численном исследовании влияния температуры подогрева воздуха, идущего на горение сжигаемого топлива, были приняты следующие допущения: процессы горения и теплообмена стационарны; горение топлива гидродинамически стабилизировано по длине топочной камеры; плотность теплового потока на поверхности стенки топки постоянна; производительность котельного агрегата задана и постоянна; нагрев диатермического масла ведется при постоянной температуре.

Условия однозначности: физические условия — физические свойства (вязкость, плотность, теплоемкость, теплопроводность); геометрические условия определяются диаметральными и осевыми размерами; начальные условия — рассчитывается средняя температура стенки теплопередающей спирали;

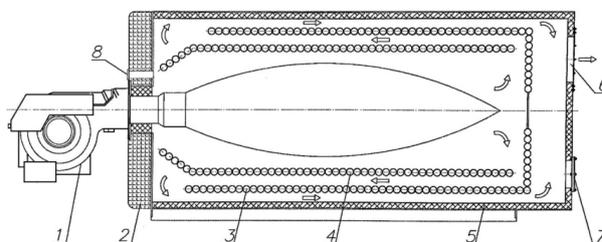


Рис. 2. Продольный разрез термомаслогрейного котельного агрегата нефтехимического производства Lavart 500 DMH:

- 1 — горелочное устройство; 2 — корпус котла;
- 3 — внешняя спираль; 4 — внутренняя спираль;
- 5 — изоляция корпуса; 6 — присоединение газохода;
- 7 — взрывной клапан; 8 — смотровое окно

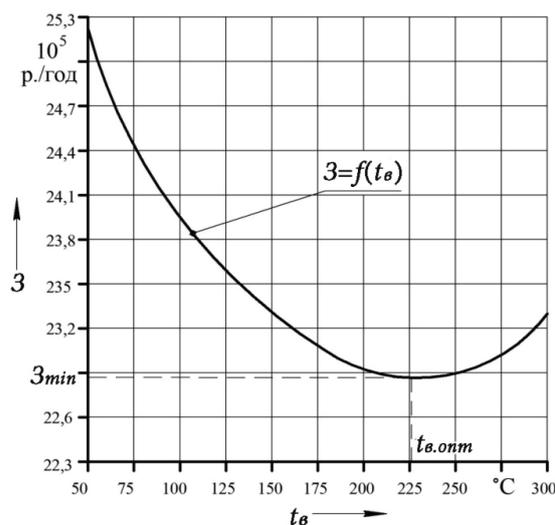


Рис. 3. Зависимость суммарных дисконтированных затрат по рекуперативному устройству и сжигаемому топливу от температуры подогрева воздуха

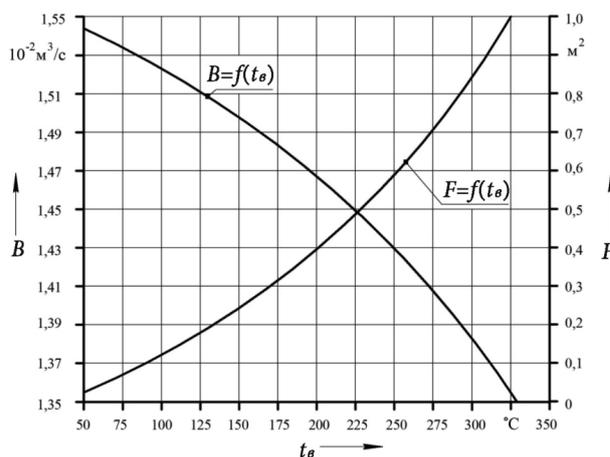


Рис. 4. Зависимость расхода сжигаемого топлива и поверхности нагрева рекуперативного устройства от температуры подогрева воздуха

граничные условия третьего рода для рабочего пространства котла.

Реализация разработанного алгоритма применительно к условиям эксплуатации котла Lavart 500 DMH на заводе АО «Газпромнефть-ОНПЗ» в городе Омске, показала следующие результаты:  $t_{в.опт} = 226$  °С и минимальные суммарные дисконтиро-

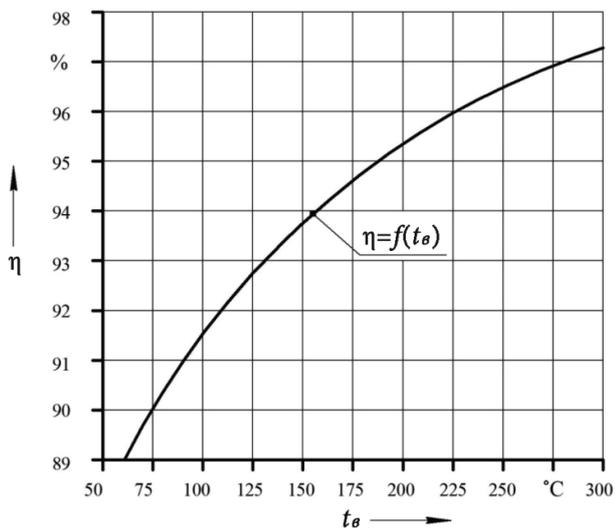


Рис. 5. Зависимость коэффициента полезного действия котельного агрегата Lavart 500 DMH от температуры подогрева воздуха

ванные затраты по рекуперативному устройству и расходу сжигаемого топлива 2285000 руб./год (рис. 3).

#### Выводы

1. Результаты численного исследования показывают: повышение температуры подогрева воздуха, идущего на горение сжигаемого энергоносителя (природный газ), до оптимального значения снижает расход топлива (рис. 4) и повышает коэффициент полезного действия (рис. 5) рассматриваемого котельного агрегата до 10 %.

2. Повышение температуры подогрева воздуха и определение её оптимального значения в рекуперативном устройстве способствует максимальному технико-экономическому эффекту работы котельного агрегата с учётом наименьших затрат.

3. Разработан алгоритм определения оптимальной температуры подогрева воздуха, идущего для горения сжигаемого топлива в термомаслогрейных котельных агрегатах.

4. Результаты исследования подтверждают целесообразность его использования при проектировании котлов нефтехимического производства, работающих на высокотемпературных теплоносителях.

#### Библиографический список

1. Оснос В. Б. Энергосберегающая технология добычи трудноизвлекаемых запасов нефти: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2016. 153 с.

2. Ибатуллин Р. Р., Кунеевский В. В., Оснос В. Б. Исследование эффективности применения высокотемпературных теплоносителей для добычи высоковязкой и битуминозной нефти // Нефтяное хозяйство. 2013. № 1. С. 62–64.

3. Тишаев С. Котлы на высокотемпературном теплоносителе // AW-Therm. 2014. № 3. URL: <https://aw-therm.com.ua/kotly-na-vysokotemperaturnom-teplonositele> (дата обращения: 04.05.2018).

4. Парамонов А. М., Стариков А. П., Резанов Е. М. [и др.] Комплексная оптимизация работы и конструкции нагревательных печей // Промышленная энергетика. 2010. № 1. С. 42–47.

5. Парамонов А. М., Резанов Е. М. Повышение эффективности энергосбережения при работе нагревательных печей термических цехов // Промышленная энергетика. 2014. № 10. С. 21–24.

6. Шерстобитов М. С., Лебедев В. М., Резанов Е. М. Определение оптимальной температуры подогрева воздуха, необходимого для горения в мусоросжигательных котельных агрегатах // Омский научный вестник. 2015. № 2 (140). С. 173–177.

7. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / Под ред. Г. М. Кагана. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. 260 с.

8. Бакластов А. М. Проектирование, монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок. М.: Энергия, 1970. 568 с.

9. Зайцев Н. Л. Экономика организации. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Экзамен, 2004. 624 с. ISBN 5-946921-99-1.

10. Парамонов А. М., Крайнов В. В. Повышение тепловой эффективности и экономичности работы нагревательных печей: моногр. М.: Спутник +, 2006. 225 с. ISBN 5-364-00238-1.

11. Парамонов А. М., Резанов Е. М., Рыжкова Е. Н., Кожина О. В. Определение оптимальной температуры подогрева воздуха, необходимого для горения топлива в печах с радиационными трубами // Промышленная энергетика. 2011. № 2. С. 35–38.

12. Официальный сайт закрытого акционерного общества «Омский завод инновационных технологий». URL: <http://omzit.ru/products/kotly-maslogrejnje/> (дата обращения: 04.05.2018).

**РЕЗАНОВ Евгений Михайлович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теплоэнергетика».

SPIN-код: 6614-1187

AuthorID (РИНЦ): 659903

Адрес для переписки: rezanove1@mail.ru

#### Для цитирования

Резанов Е. М. Повышение технико-экономической эффективности работы термомаслогрейных котельных агрегатов // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 84–87. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-84-87.

Статья поступила в редакцию 14.05.2018 г.

© Е. М. Резанов