УДК 662.998

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ ВНУТРИ ФУТЕРОВКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ УСТАНОВКИ ЗА СЧЕТ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ МЕТАНА

Канд. техн. наук, доц. **Нешпоренко Е.Г.**
Д-р техн. наук, проф. **Картавцев С.В.**
Магистрант **Иванова С.В.**
Магнитогорский технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск

Аннотация. *Предложена математическая модель процесса рекуперации теплоты внутри футеровки высокотемпературной установки за счет термического разложения метана в условиях охлаждения высокотемпературных установок. Исследуемая модель позволяет оценить возможность использования регенеративного теплоиспользования, с целью снижения тепловых потерь через ограждение высокотемпературной установки за счет утилизации теплоты жидкого теплоносителя, позволяя повысить производительность высокотемпературного процесса. Все высокотемпературные установки имею основную задачу – обеспечение непрерывности процесса с минимальным расходом топлива, используя энергию как основных, так и вторичных энергоресурсов (ВЭР). В условиях пиролиза метан наиболее термически устойчив, так как термическая деструкция метана термодинамически возможна при температуре выше 560 ℃. Однако достигая значительных скоростей движения метан разлагается при температурах порядка 900℃, а при температуре больше 1400 ℃ полностью распадается на углерод и водород. Природный газ как энергоноситель имеет массу достоинств и по сравнению с другими видами топлива может быть использован в полной мере, так как для него легко организовать полное сжигание с минимальными потерями тепла. Стоит отметить, что в природном газе отсутствует балласт и вредные примеси, также ему свойственна высокая теплота сгорания и при сжигании развиваются высокие температуры.*

Ключевые слова: *энергетический баланс, высокотемпературные процессы, термическое разложение метана, охлаждение футеровки, энергоэффективность.*

Промышленные высокотемпературные установки относятся к основным потребителям топливно-энергетических ресурсов страны. Все

теплотехнологические высокотемпературные схемы связаны с высокой энергоемкостью и относительно низкой энергоэкономичностью.

Повышение эффективности использования топлива в высокотемпературных установках достигается тремя путями [1, 2, 3]:

– уменьшение тепловых отходов;

– регенерации тепловых отходов;

– внешнее использование тепловых отходов в энергетических или технологических целях.

Для большинства высокотемпературных реакторов на показатели топливоиспользования влияют тепловые потери теплоты через кладку и с охлаждением отдельных элементов ограждения, в окружающую среду.

Рассматривая тепловые потери, теряемые через ограждение, то метод термохимической регенерации с применением перфорированного ограждения позволит дополнительно снизить расход топлива на технологический процесс.

Перфорированное ограждение представляет собой стенку с равномерно продуваемыми отверстиями, позволяющий отбирать тепло от стенки высокотемпературного реактора и возвращая тепловые потери в технологический процесс [4, 5]. В качестве такого газа рассматривается газообразное топливо – природный газ.

При нагревании природного газа свыше 1400 ℃ осуществляется процесс термического разложения метана на углерод и водород [6].

Существует множество аппаратов для пиролиза метана в жидком теплоносителе, которые позволяют снизить тепловые потери через стенки высокотемпературного реактора за счет утилизации теплоты отработанного газообразного теплоносителя, что приводит к повышению эффективности установки [7, 8, 9]. При предварительном подогреве углеводородного сырья в патрубке подвода метана за счет утилизации теплоты отработанного газообразного теплоносителя, снижает тепловые потери в окружающую среду, что приводит к повышению производительности аппарата для пиролиза природного газа в жидком теплоносителе [9, 10].

Цель работы

Исследование математической модели процесса рекуперации теплоты внутри футеровки высокотемпературной установки за счет разложения термического разложения метана, что дает определить коэффициент теплоотдачи и температурного поля нагрева метана внутри одной трубки при заданных граничных условиях и теплофизических параметрах рассматриваемой системы.

Решение поставленной задачи позволит повысить энергоэффективность высокотемпературного процесса. Также входе расчетов был проведен анализ существующих аппаратов для пиролиза метана с жидким теплоносителем для производства черной металлургии, определены зависимости: теплоотдачи, режима течения газа (при Re≤105), число Нуссельта, количество теплоты, принятой и отданной в процессе разложения, от температуры нагрева природного газа и представлен график долей углерода и водорода входе термического разложения в условиях охлаждения высокотемпературной установки.

1. Термическое разложение метана

Постановка задачи

Отверстие расположено в ограждении высокотемпературной установки и подвергается воздействию высоких температур со стороны зоны обработки материала, где также на отверстие подается определенное количество теплоты. Внешние стенки отверстия принудительно не охлаждаются и находятся под воздействием окружающей среды температура, которой ниже температуры внутренних стенок отверстия.

Природный газ поступает в отверстие (рис. 1) диаметром $d_{отв}$ = 0,1 м, с температурой окружающей среды $t_{нач}$ = 0 ℃ и со скоростью движения $w_{ПГ}$ = 3 м/с, температура внутри высокотемпературной установки $t_{кон}$ = 1500 ℃.

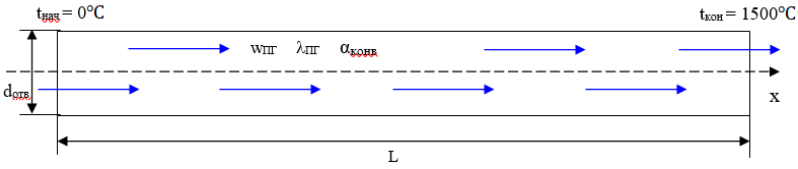


Рис. 1. Постановка задачи отверстия с теплоносителем

Во время движения внутри трубки, природный газ начинает постепенно нагреваться от противоположно движущегося теплового потока жидкого теплоносителя, получая энергию для диссоциации С-Н (1), тем самым приобретенная энергия природным газом возвращается обратно в высокотемпературный процесс [11, 12]:

$$2CH_4 \overset{t_{CH_4}}{\Longrightarrow} 2 \cdot d_{CH_4} \cdot CH_4 + 2 \cdot d_{H_2} \cdot H_2. \quad (1)$$

Решение поставленной задачи

Задача относится к уравнению нестационарной теплопроводности, так как температура природного газа, на каждом участке трубы, изменяется во времени, где также изменяется количество подведенной Q_1 кДж/м^3 и отведенной теплоты Q_2 кДж/м^3. Течение внутри трубки рассматривается относительно координатной плоскости X.

Краевыми условиями для решения дифференциального уравнения теплопроводности являются действие теплового потока жидкого теплоносителя на движущейся поток газа, внутри трубки. Распределение температуры природного газа tПГ и коэффициента теплоотдачи α от поверхности стенок трубки к движущемуся газу задается граничными условиями 3-го рода (2, 3) [11]:

$$\alpha_т(t_{кон} - t_{нач}) = -\lambda_т \frac{dt}{dx}, \quad (2)$$

где: $\alpha_т$ – коэффициент теплоотдачи стенки трубки, Вт/(м2 · ºС); $t_{кон}$ – температура на конце трубки, ºС; $t_{нач}$ – начальная температура движущегося теплоносителя, ºС; $\lambda_т$ – теплопроводность стенки трубки, Вт/(м·ºС); t – искомая температура движущегося теплоносителя, ºС.

Температурное поле рассчитывается помощью метода конечных разностей (рис. 2), используя уравнение:

$$\frac{d}{dx}\left(\lambda_т \frac{dt}{dx}\right) + \frac{d}{dr}\left(\lambda_т \frac{dt}{dr}\right) = 0. \quad (3)$$

Расчеты граничных условий дополняются критериальными уравнениями расчета теплоотдачи. При ламинарном движении теплоносителя в трубе (3) [11]:

$$Nu = 0{,}15 \cdot Re^{0.33} \cdot Pr^{0.43} \cdot Gr^{0.1} =$$
$$= 0{,}15 \cdot Re^{0.33} \cdot Pr^{0.43} \cdot \left(\frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot \left(\frac{L}{30}\right)^3}{\nu^2}\right)^{0.1}. \quad (4)$$

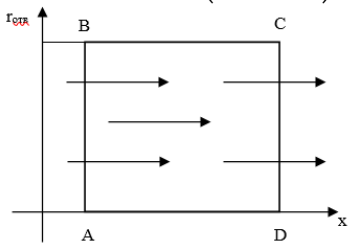


Рис. 2. Одна вторая ось-симметричная область отверстия

В ходе расчетов, трубку разделили на 30 частей, чтобы определить в разный момент времени коэффициент теплоотдачи и температуру нагрева движущегося теплоносителя, при условии $Q_1 \approx Q_2$:

$$Q_1 = \alpha_{ПГ} \cdot (t_{кон} - t_{нач}) \cdot \pi \cdot d_{отв} \cdot \frac{L}{30}, \quad (5)$$

$$Q_2 = C \cdot \rho_{ПГ} \cdot V_{ПГ} \cdot (t_{кон} - t_{нач}) \cdot \pi \cdot \omega_{ПГ} \cdot \frac{{d_{отв}}^2}{4}, \quad (6)$$

$$\alpha_{ПГ} \cdot (t_{кон} - t_{нач}) \cdot \pi \cdot d_{отв} \cdot \frac{L}{30} = C \cdot \rho_{ПГ} \cdot V_{ПГ} \cdot (t_{кон} - t_{нач}) \cdot \pi \cdot \omega_{ПГ} \cdot \frac{{d_{отв}}^2}{4}. \quad (7)$$

В разный момент времени при постоянном диаметре и скорости, метан начинает отбирать тепло от стенок отверстия и распадается на углерод и водород в определенных долях в зависимости от температуры нагрева (рис. 3). Из графика видно, что при достижении температуры нагрева метана свыше 500 ºС увеличивается скорость разложения метана, и доля чистого метана становится меньше, а доля водорода увеличивается. Также при 900 ºС наблюдается полное разложение метана на С-Н.

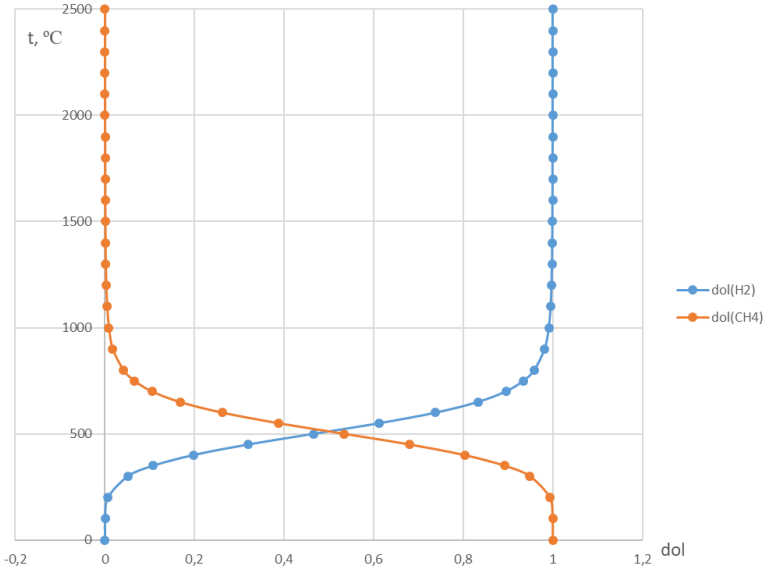


Рис. 3. Зависимости долей метана и водорода от температуры нагрева

Исходя из выше изложенных расчетов и полученных значений тепловых потоков, были выявлены зависимости коэффициентов теплоотдачи, теплопроводности и критерия течения газообразного теплоносителя, от температуры разложения метана (рис. 4–6).

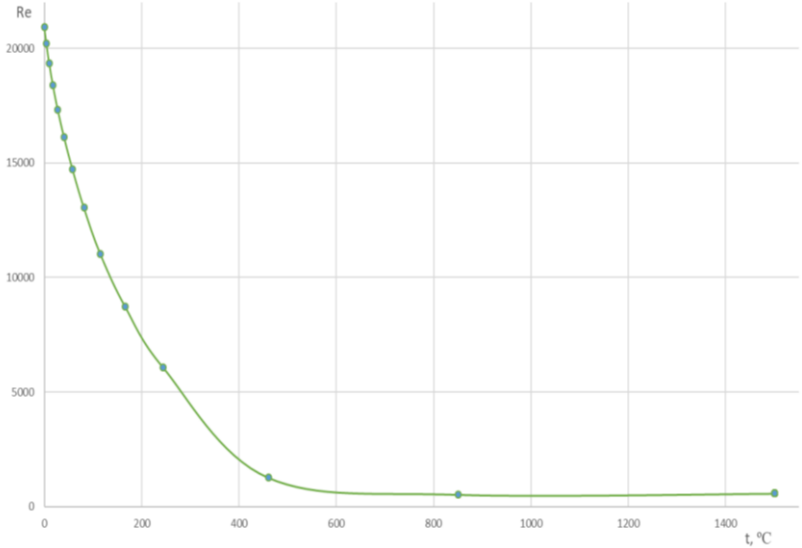


Рис. 4. Критерий течения газообразного теплоносителя ПГ

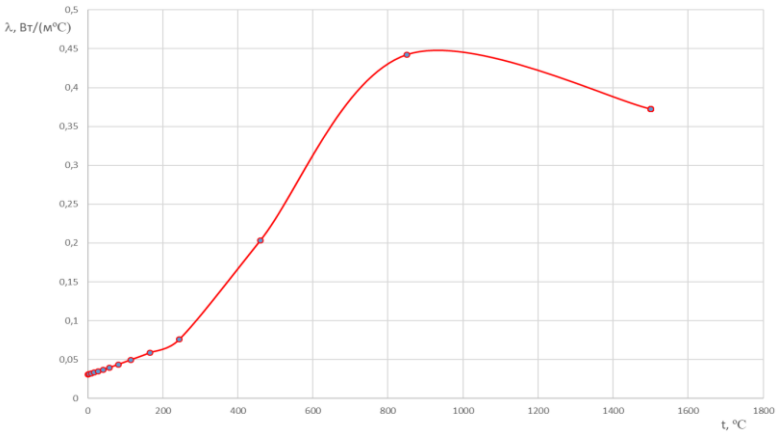


Рис. 4. Коэффициент теплопроводности ПГ

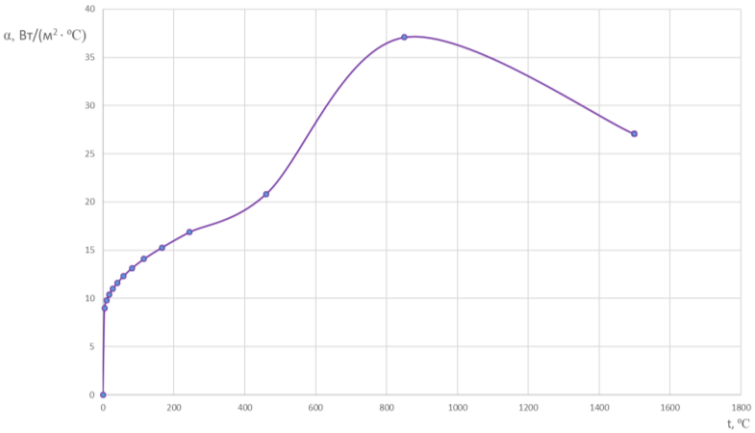


Рис. 6. Коэффициент теплоотдачи ПГ

На рис. 7 показаны тепловые потоки движущегося теплоносителя внутри отверстия и поток от жидкого теплоносителя, где на каждом из участков отверстия метан приобретает и отдает приблизительно одинаковый тепловой поток и возвращает его обратно в жидкий теплоноситель. Согласно рис. 7 на 13 участке отверстия метан полностью распадается и нагревается до конечной температуры жидкого теплоносителя tкон = 1500ºС, и тепловой поток не успевает дойти до конца отверстия, что позволяет снизить тепловые потери внутри высокотемпературного процесса [13].

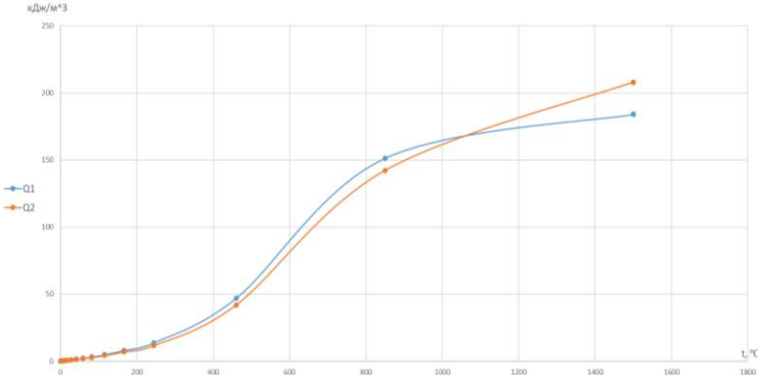


Рис. 7. Тепловые потоки

2. Результаты исследования

В качестве газообразного теплоносителя рассматривался природный газ с температурой 0ºС, температура жидкого теплоносителя внутри высокотемпературной установки 1500ºС. Количество выделяемой теплоты от процесса термического разложения метана равно 183,9 – 207,9 кДж/м^3. Максимальное среднее значение коэффициента теплоотдачи природного газа внутри отверстия составил 37,1 Вт/(м^2·ºС), при диаметре 0,1 м отверстии и длине 1 м. Теплопроводность газа входе разложения при температуре 1500ºС составил 0,37 Вт/(м·ºС). Все представленные расчеты являются продолжением исследования продувки перфорированного ограждения, для снижения тепловых потерь через ограждения высокотемпературных процессов и установок [14-16].

Заключение

Входе решения поставленной задачи, составлена математическая модель энергетического баланса процесса термического разложения метана в условиях охлаждения высокотемпературных технологических установок, где были получены теплофизические свойства метана при нагревании от жидкого теплоносителя. Полученное решение дает возможность оценить применения природного газа в качестве газообразного теплоносителя внутри перфорированного ограждения, для регенерации теплового потока [17, 18, 19, 20], что позволит снизить тепловые потери и повысит процесс интенсификации плавки внутри высокотемпературной установки.

Библиографический список

1. Высокотемпературные теплотехнические процессы и установки: Учеб. для вузов / И.И. Перелетов, Л.А. Бровкин, Ю.И. Розенгарт и др.; Под ред. А.Д. Ключникова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 336 с.

2. **Ключников А.Д.** Энергетика технологии и вопросы энергосбережения. М.: Энергоатомиздат, 1986. 128 с.

3. **Чоджой М.Х.** Энергосбережение в промышленности / Пер. с анг. М.: Металлургия, 1982. 272 с.

4. **Нешпоренко Е.Г., Баскакова А.А.** Математическая модель теплового состояния пластины с равномерно распределенными продуваемыми отверстиями // Энергетика Теплотехнологий. 2018. № 4. С. 9-12. [eLIBRARY ID: 37416648]

5. **Ячиков И.М., Миронова Г.А., Петин С.Н.** Математическое моделирование теплового состояния расплава в реакторе с кипящем слоем // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. 2007. № 1(1). С.170-176. [eLIBRARY ID: 21357669]

6. **Рябов В.Д.** Химия нефти и газа. М.: Техника, 2004. 288 с.

7. Пат. RU 71982 U1 МПК C10G 9/34. Устройство пиролиза сырья в жидком теплоносителе / С.Н. Петин, А.Д. Ключников; патентообл. ГОУВПО «МЭИ». № 2007141786/22, заявл. 14.11.2007, опубл. 27.03.2008. [eLIBRARY ID: 38436541]

8. Пат. RU 58120 U1 МПК C10G 9/34. Аппарат для пиролиза углеводородного сырья в жидком теплоносителе / С. В. Картавцев, С. Н. Петин, Е. Г. Нешпоренко, А. В. Бурмакина; патентообл. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. № 2006114864/22; заявл. 02.05.2006, опубл. 10.11.2006. [eLIBRARY ID: 38427992]

9. Пат. RU 2352519 C1 МПК C01B 3/02. Способ пиролиза углеводородного сырья / А.Д. Ключников, С.Н. Петин; патентообл. ГОУВПО «МЭИ». № 2007141785/04, заявл. 14.11.2007, опубл. 20.04.2009, Бюл. № 11. [eLIBRARY ID: 37547506]

10. **Шиповская Ю.И., Петин С.Н.** Перспектива производства СПГ на котельной / Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2017: сб. науч. ста. 6-й Межд. мол. науч. конф. Том 4. Курск: Университетская книга, 2017. С. 275-277. [eLIBRARY ID: 31750369]

11. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача: уч. для вузов / 4-е изд., перераб и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

12. **Гольдфарб Э.М.** Теплотехника металлургических процессов. М.: Металлургия, 1967. 439 с.

13. **Вафина Д.Э., Бикмухаметова К.М., Картавцев С.В.** Влияние потерь теплоты через ограждения в высокотемпературных теплотехнологических процессах // Энерго - и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: мат. Даниловских чтений. Екатеринбург: УрФУ, 2018. С. 99-102.

14. **Wesenberg M.H.** Gas Heated Steam Reformer Modelling: Ph. D. Thesis. Trondheim (Norwegian): TNNU, 2006. 210 c.

15. **Попов С.К., Свистунов И.Н.** Энергосбережение в топливных печах посредством конверсии природного газа // Вестник МЭИ. 2017. № 2. С. 45–54. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-2-45-54. [eLIBRARY ID: 28879326]

16. **Картавцев С.В., Иванова С.В., Старкова Е.С.** Оценка значения тепловых потерь в высокотемпературных процессах // Современные достижения университетских научных школ: сб. докл. нац. науч. школы-конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. Вып. 4. С. 71–72. [eLIBRARY ID: 42325663]

17. **Нешпоренко Е.Г., Картавцев С.В.** Вопросы энергоресурсосбережения при извлечении железа из руд: монография Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2007. 153 с. [eLIBRARY ID: 19603958]

18. **Нешпоренко Е.Г., Картавцев С.В., Сысуев Н.Е.** Обоснование эффективности регенерации теплоты через перфорированные ограждения

высокотемпературных установок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова. 2013. № 1 (41). С. 86–89. [eLIBRARY ID: 18882670]

19. **Нешпоренко Е.Г.** Экспериментальное исследование гарниссажного режима регенерации теплоты через перфорированное ограждение установок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 4 (32). С. 81–84. [eLIBRARY ID: 15521025]

20. **Нешпоренко Е.Г.** Регенерация тепловых потерь через перфорированное ограждение высокотемпературных технологических установок // Вестник Московского энергетического института. 2008. № 1. С. 74–78. [eLIBRARY ID: 10344468]

STUDY OF HEAT RECOVERY PROCESS INSIDE A LINING OF A HIGH-TEMPERATURE PLANT USING THERMAL DECOMPOSITION OF METHANE

E.G. Neshporenko, S.V. Kartavtcev and S.V. Ivanova
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk

Abstract. The paper has suggested the mathematical model of the heat recovery process inside the high-temperature plant`s lining using thermal decomposition of methane in conditions of high-temperature plants cooling. The examined model allows evaluation of regenerative heat use possibility to reduce heat losses through the enclosure of high-temperature plant by utilizing the heat of a liquid heat carrier which can increase high-temperature process productiveness. All high-temperature plants have a primary objective – ensure process continuity with minimal fuel flow rate using the energy of primary as well as secondary energy resources (SER). In pyrolysis conditions, methane is the most thermally stable because methane thermal decomposition happens at a temperature higher than 560°C. However, when methane reaches a significant speed of movement it decomposes at a temperature of about 900°C, and temperature 1400°C breaks up to carbon and oxygen. Natural gas, as an energy carrier, has many advantages and in comparison, with the other fuel types, it can be used to the full extent because it is easy to organize its complete combustion with minimal heat losses. It should be noted that natural gas has no ballast or harmful substances, it possesses high heat value and its combustion creates high temperatures.

Keywords: energy balance, high-temperature process, methane thermal decomposition, cooling of lining, energy efficiency.