



УДК 536.7

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА В ТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ С УЧЕТОМ НЕПОСТОЯНСТВА ЕГО СОСТАВА

В.М. Ларионов¹, Э.Р. Сайфуллин¹, С.А. Назарычев¹, А.О. Малахов¹, Ю.В. Ваньков²

¹Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: Проблема рационального использования природных ресурсов, повышения энергоэффективности и энергосбережения актуальна в настоящее время. В рамках данной проблемы стоит задача рационального и эффективного использования попутного нефтяного газа. Состав попутного нефтяного газа, ввиду специфики его производства, непостоянен во времени. Данные изменения приводят к нарушению оптимального режима горения в тепловых энергетических установках. В данной статье представлен алгоритм оптимизации горения углеводородного топлива переменного состава, в частности попутного нефтяного газа. Были разработаны алгоритмы: определения начального соотношения «топливо-воздух» в теплоэнергетической установке и доведения начального соотношения до оптимального; оптимизации процесса горения в случае изменения удельной теплоты сгорания топлива. Алгоритмы основаны на регистрации изменения температуры теплоносителя на выходе тепловой энергетической установки.

Ключевые слова: теплофизика, теплоэнергетика, оптимизация горения, алгоритм оптимизации, переменный состав топлива, попутный нефтяной газ, утилизация попутного нефтяного газа.

Благодарности: Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE COMBUSTION PROCESS OF ASSOCIATED PETROLEUM GAS IN THERMAL POWER PLANTS, TAKING INTO ACCOUNT THE VARIABILITY OF ITS COMPOSITION

V.M. Larionov¹, E.R. Saifullin¹, S.A. Nazarychev¹, A.O. Malahov¹, Y.V. Vankov²

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

²Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

Abstract: Problems of natural resources rational using, energy efficiency and energy saving are topical at present. As part of this problem is actual task of rational and efficient use of associated petroleum gas. The composition of associated petroleum gas due to the nature of its production variable over time. These changes lead to the violation of the combustion optimal mode in thermal power plants. This article presents the algorithm of combustion optimization of hydrocarbon fuels variable composition, in particular of associated petroleum gas. There were developed the algorithms: the determination of initial ratio "fuel-air" in thermal power plants and to bring this

ratio to the optimum; optimization of the combustion process during change of the specific heat of combustion. The algorithms are based on registration of change coolant temperature at the outlet of thermal power plant.

Keywords: *thermophysics, heat power engineering, optimization of combustion, optimization algorithm, fuel variable composition, associated petroleum gas, utilization of associated petroleum gas.*

Acknowledgments: *The work is performed according to the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University.*

Введение

В настоящее время одной из острых и неразрешённых проблем в нефтегазовом и энергетическом секторе, как в Российской Федерации, так и в других странах, является проблема утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) и отходов нефтехимических производств [1]. Наиболее разработанным и доступным способом утилизации является его сжигание преимущественно в факелах или в тепловых энергетических установках, например котельных агрегатах и газотурбинных установках [2]. Актуальность сжигания данных видов топлива в тепловых энергетических установках подтверждает Постановление Правительства РФ от 08.01.2009 N 7 [3], в котором заложено требование по доведению уровня утилизации ПНГ на факельных установках не выше 5 %. Также в Федеральном проекте от 11.11.2008 [4] изложена необходимость конверсии природного и попутного нефтяного газа вблизи мест добычи нефти, в том числе в тепловую и электрическую энергию.

Сжигание ПНГ в котельных агрегатах, ввиду специфики данного топлива, сопровождается неконтролируемыми изменениями его состава. Данные изменения, например отклонения удельной теплоты сгорания (УТС) топлива от принятых при расчете котла значений, негативно влияют на процесс горения и теплосъема от горячих продуктов сгорания, снижают эффективность процесса сжигания, например: появляется химический недожог, снижается КПД, наносится ущерб окружающей среде.

Задачей оптимизации сжигания таких топлив является обеспечение полного сгорания топлива и заданной тепловой мощности энергетической установки в случае изменения состава топлива.

Известен способ автоматической оптимизации процесса горения в котле [5], основанный на регулировании расхода воздуха с целью устранения оксида углерода и поддержания оптимальной концентрации кислорода в продуктах сгорания. Недостатком способа является необходимость предварительного задания оптимального количества кислорода в дымовых газах, что практически невозможно в случае использования топлив переменного состава. Недостаток существенно ограничивает область применения известного способа.

Известен способ автоматической оптимизации процесса горения в топке парового котла [5]. В данном способе показателем оптимальности процесса горения является тепловой коэффициент полезного действия (КПД) котла, который определяют по измеренным значениям теплового потока, поступающего из топки в циркуляционный контур котла, и теплового потока, вносимого топливом в топку. Способ осуществляют путем измерения характеризующих КПД котла параметров и соотношения топливо–воздух, определения отклонений измеренных сигналов от заданных значений, последующего изменения с помощью корректирующего регулятора расхода воздуха по сумме этих отклонений и осуществления экстремального регулирования. В качестве характеризующих КПД котла параметров используют: поступающий из топки в циркуляционный контур

барабанного котла текущий тепловой поток; вносимый в топку котла с топливом текущий тепловой поток; корреляционное измерение временного сдвига указанных тепловых потоков; синхронизированное отношение указанных тепловых потоков. Определяют корреляцию указанного отношения с расходом воздуха, по которой осуществляют экстремальное регулирование.

Однако имеющиеся методы [5–6] оптимизации горения не позволяют оперативно реагировать на изменение состава топлива или требуют его непрерывного анализа, анализа продуктов сгорания и разработки сложных автоматизированных систем управления.

Цель данной работы – разработка алгоритма оптимизации процесса горения попутного нефтяного газа в тепловых энергетических установках.

Алгоритм

Действующие теплоэнергетические установки, в частности паровые и водогрейные котлы, работают по «режимной карте», которая составляется на определенную удельную теплоту сгорания топлива. УТС топлива задается поставщиком газа и считается постоянной. Реальный состав топлива переменный во времени. Приборами непрерывного анализа состава топлива котельные не оснащены. Эти изменения приводят к нарушению оптимального режима работы действующих котлов.

В процессе эксплуатации тепловой энергетической установки всегда имеется достаточно длительный период времени, когда удельная теплота сгорания топлива остается, примерно, постоянной. Однако её значение может отличаться от принятого в «режимной карте». В этом случае алгоритм оптимизации сжигания топлива состоит в следующем. Начальная ситуация не определена, так как неизвестен точный состав топлива в момент выхода теплоэнергетической установки на заданный режим. Соотношение «топливо–воздух» определяется коэффициентом избытка воздуха α :

Вариант 1. Переизбыток воздуха ($\alpha > 1$).

Вариант 2. Соотношение «топливо–воздух» оптимальное ($\alpha = 1$).

Вариант 3. Переизбыток топлива ($\alpha < 1$).

Для определения соотношения «топливо–воздух» необходимо, не изменяя расхода воздуха $G_{\text{в}}$, уменьшить расход топлива $G_{\text{т}}$ на небольшую величину $\Delta G_{\text{т}}$ ($\Delta G_{\text{т}}/G_{\text{т}} \ll 1$). Спустя некоторое время температура горения (рис. 1) и температура теплоносителя на выходе изменятся. Из-за неопределенности начального состояния возможны два варианта:

1. Температура горения и температура теплоносителя понизятся. Это соответствует **Варианту 1 и Варианту 2**.
2. Температура горения и температура теплоносителя незначительно повысится или останется прежней. Это соответствует **Варианту 3**.

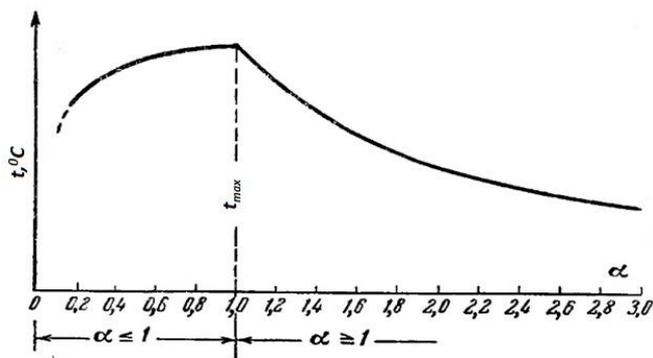


Рис. 1. Характер кривой теоретической температуры горения топлива при недостатке и избытке воздуха. По оси абсцисс – коэффициент избытка воздуха α ; по оси ординат – температура горения топлива t , °С

В случае, если температура теплоносителя понизилась, следует вернуть прежнее значение расхода топлива G_T и, оставляя его неизменным, уменьшить расход воздуха G_B на небольшую величину ΔG_B , причем $(\Delta G_B/G_B \ll 1)$. Спустя некоторое время, температура теплоносителя на выходе изменится. Возможны два варианта:

1. Температура теплоносителя повысится. Это соответствует **Варианту 1**.
2. Температура теплоносителя понизится. Это соответствует **Варианту 2**.

Вариант 1. Снижаем расход топлива, до момента, когда температура теплоносителя понизится до начального заданного значения. Затем, не изменяя расхода топлива, снижаем расход воздуха до того момента, пока температура теплоносителя не увеличится. Если после очередного уменьшения расхода воздуха температура теплоносителя не повышается, следует вернуть расход воздуха к предыдущему значению, так как достигнуто оптимальное соотношение «топливо–воздух».

Вариант 2. Необходимо восстановить первоначальный расход воздуха, так как изначальное соотношение «топливо–воздух» было оптимальное.

Вариант 3. Не изменяя расхода воздуха, начать уменьшение расхода топлива до того момента, пока температура теплоносителя на выходе не начнет уменьшаться. При регистрации уменьшения температуры теплоносителя необходимо вернуть предыдущее значение расхода топлива. Достигнуто оптимальное соотношение «топливо–воздух».

В некоторый момент времени УТС топлива изменяется на небольшую величину Δq относительно начального значения q_0 ($\Delta q/q_0 \ll 1$), после чего остается постоянной в течение времени порядка времени тепловой инерции тепловой энергетической установки. Влияние изменения УТС основано на математической модели, описанной в работах [7, 8, 9]. Можно выделить 2 случая:

Случай 1. Увеличение УТС.

Случай 2. Уменьшение УТС.

Случай 1. Этот случай соответствует недожогу топлива, так как имеющегося воздуха не хватает для его полного сгорания ($\alpha < 1$). В то же время, вследствие увеличения УТС тепловой эффект процесса горения практически не изменяется. В итоге передаваемый продуктами сгорания теплоносителю тепловой поток практически не изменяется, что выражается постоянством температуры теплоносителя на выходе. Для подтверждения увеличения УТС топлива необходимо сократить расхода топлива. В этом случае уменьшение расхода топлива при постоянном расходе воздуха повышает полноту сгорания топлива и температуру горения [5]. Увеличение выходной температуры теплоносителя или её постоянство подтверждает данный случай. Последующие действия заключаются в периодических снижениях расхода топлива. Уменьшение расхода топлива завершается, когда температура теплоносителя на выходе уменьшается на величину, превышающую точность измерения этого параметра. Это означает, что количество сжигаемого топлива снизилось настолько, что появился избыток воздуха, приводящий к уменьшению температуры горения и теплоносителя на выходе. В этом случае необходимо увеличить расход топлива до предыдущего значения. Процесс оптимизации горения считается завершённым, так как достигнут минимальный расход топлива, сжигание которого обеспечивает заданную величину теплового потока, сообщаемого теплоносителю.

Случай 2. В отличие от первого случая, топливо сгорает полностью вследствие того, что количество воздуха превышает теоретически необходимое для полного сжигания ($\alpha > 1$). В то же время избыток воздуха уменьшает температуру горения. В итоге, передаваемый продуктами сгорания теплоносителю тепловой поток снизится, что выражается падением температуры теплоносителя на выходе. Для подтверждения уменьшения УТС топлива необходимо сократить расхода топлива. В этом случае уменьшение расхода топлива при постоянном расходе воздуха понижает полноту сгорания топлива и температуру горения [10]. Если сокращение расхода топлива приводит к тому, что выходная температура теплоносителя уменьшается, необходимо завершить сокращение расхода и стабилизировать

расход топлива. После стабилизации подачи топлива необходимо начать дискретное увеличение подачи топлива. Когда после очередного увеличения подачи топлива не удается повысить температуру теплоносителя на выходе теплообменника до заданного значения, необходимо вернуть расход топлива к предыдущему значению. Это означает, что достигнут случай со стехиометрическим соотношением топлива и воздуха ($\alpha = 1$), обеспечивающий полное сжигание топлива. Далее в течение некоторого времени осуществляют мониторинг выходной температуры теплоносителя. Если эта температура остается постоянной, оптимизацию сжигания топлива считают завершённой.

Выводы

1. Разработан алгоритм оптимизации сжигания ПНГ. Её краткое содержание следующее:

Для определения начального соотношения «топливо–воздух» необходимо, не изменяя расхода воздуха, уменьшить расход топлива на небольшую величину. Повышение температуры теплоносителя на выходе свидетельствует о недожоге топлива. Если температура теплоносителя понизится, следует вернуть предыдущее значение расхода топлива и, не изменяя его, уменьшить расход воздуха на небольшую величину. Повышение температуры теплоносителя на выходе свидетельствует об избытке воздуха, понижение температуры теплоносителя – об оптимальности соотношения «топливо–воздух».

В случае избытка воздуха алгоритм оптимизации состоит в следующем: необходимо снизить расход топлива до момента, когда температура теплоносителя понизится до начального заданного значения. Затем, не изменяя расхода топлива, снизить расход воздуха до того момента, пока температура теплоносителя не увеличится. Если после очередного уменьшения расхода воздуха температура теплоносителя не повысится, следует вернуть расход воздуха к предыдущему значению.

В случае недожога топлива алгоритм оптимизации состоит в следующем: необходимо, не изменяя расхода воздуха, начать уменьшение расхода топлива до того момента, пока температура теплоносителя на выходе не начнет уменьшаться. При регистрации уменьшения температуры теплоносителя необходимо вернуть предыдущее значение расхода топлива.

2. Разработан алгоритм оптимизации процесса горения в случаях, когда в течение времени порядка времени тепловой инерции тепловой энергетической установки УТС топлива изменяется на небольшую величину, после чего остается постоянной.

В случае регистрации увеличения УТС топлива алгоритм оптимизации состоит в периодических снижениях расхода топлива. Уменьшение расхода топлива завершается, когда температура теплоносителя на выходе уменьшается на величину, превышающую точность измерения этого параметра. В этом случае необходимо увеличить расход топлива до предыдущего значения.

В случае регистрации уменьшения УТС топлива алгоритм оптимизации состоит в периодическом увеличении расхода топлива. Когда после очередного увеличения подачи топлива не удается повысить температуру теплоносителя на выходе теплообменника до заданного значения, необходимо вернуть расход топлива к предыдущему значению.

Разработанный алгоритм может быть рекомендован для оптимизации процесса сжигания других видов топлив переменного состава, например отходов нефтехимических производств.

Литература

1. Кутепова Е. Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России / Е. Кутепова, А. Книжников, К. Кочи // WWF России, КПИМГ. 2012. № 4. С. 35.

2. Gur'yanov A. I. Analysis of the gas turbine engine combustion chamber conversion to associated petroleum gas and oil / A.I. Gur'yanov, O.A. Evdokimov, Sh.A. Piralishvili, S.V. Veretennikov, R.E. Kirichenko, D.G. Ievlev // Aircraft and rocket engine design and development. – 2015. - Vol. 58. - № 1. - PP. 205–209.

3. Постановление Правительства РФ от 08.01.2009 N 7 (ред. от 08.11.2012) "О мерах по стимулированию сокращения загрязнения атмосферного воздуха продуктами сжигания попутного нефтяного газа на факельных установках".

4. Федеральный проект «Долгосрочный прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2025 года» от 11.11.2008.

5. А.с. SU 735869, МПК⁵ F23N 1/02. Заявка 2431448 от 17.12.1976. Опубликовано 25.05.1980.

6. Патент RU 2425290. МПК F23N1/02 (2006.01) Приоритет от 26.10.2009. Опубликовано 27.07.2011.

7. Saifullin E.R. Optimization of burning process of hydrocarbon fuels with varying specific heat of combustion / E.R. Saifullin, Yu.V. Vankov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. - 86 (1), art. no. 012006.

8. Saifullin E.R. The heat effect of combustion process depending on fuel composition fluctuations / E.R. Saifullin, S.A. Nazarychev, A.O. Malahov, V.M. Larionov, O.V. Iovleva // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. - 789 (1), № 012045.

9. Saifullin E.R. Optimization of hydrocarbon fuels combustion variable composition in thermal power plants / E.R. Saifullin, V.M. Larionov, A.V. Busarov, V.V. Busarov, Journal of Physics: Conference Series. – 2016. - 669 (1), № 012037.

10. Кнорре Г.Ф. Теория топочных процессов / Г.Ф. Кнорре, К.М. Арефьев, А.Г. Блох //М : «Энергия». – 1966. С.491.

Авторы публикации

Ларионов Виктор Михайлович – докт. техн. наук, профессор кафедры «Техническая физика и энергетика» Казанского федерального университета (КФУ).

Сайфуллин Эмиль Ринатович – аспирант кафедры «Техническая физика и энергетика» Казанского федерального университета (КФУ).

Назарычев Сергей Александрович – аспирант кафедры «Техническая физика и энергетика» Казанского федерального университета (КФУ).

Малахов Алексей Олегович – аспирант кафедры «Техническая физика и энергетика» Казанского федерального университета (КФУ).

Ваньков Юрий Витальевич – докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Kuterova E. Problemy i perspektivy i spolzovaniya poputnogo neftyanogo gaza v Rossii / E. Kuterova, A. Knizhnikov, K. Kochi // WWF Russia, KPMG, - 2012. - № 4. – С. 35.

2. Gur'yanov A. I., Evdokimov O. A., Piralishvili Sh. A., Veretennikov S. V., Kirichenko R. E., Ievlev D. G. Analysis of the gas turbine engine combustion chamber conversion to associated petroleum gas and oil (2015) Aircraft and rocket engine design and development, Vol. 58, No. 1, pp. 205–209.

3. Постановление Правительства РФ от 08.01.2009 N 7 (ред. от 08.11.2012) "О мерах по стимулированию сокращения загрязнения атмосферного воздуха продуктами сжигания попутного нефтяного газа на факельных установках".

4. Федеральный проект «Долгосрочный прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2025 года» от 11.11.2008.

5. A.s. SU 735869, Int. Cl. F23N 1/02. Application 2431448 in 17.12.1976. Published 25.05.1980. Description of innovation.

6. Patent RU 2425290. Int. Cl. F23N1/02 (2006.01) Priority 26.10.2009. Published 27.07.2011. Description of innovation.

7. Saifullin E.R. Optimization of burning process of hydrocarbon fuels with varying specific heat of combustion / E.R. Saifullin, Yu.V. Vankov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. - 86 (1), art. no. 012006.

8. Saifullin E.R. The heat effect of combustion process depending on fuel composition fluctuations / E.R. Saifullin, S.A. Nazarychev, A.O. Malahov, V.M. Larionov, O.V. Iovleva // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. - 789 (1), № 012045.

9. Saifullin E.R. Optimization of hydrocarbon fuels combustion variable composition in thermal power plants / E.R. Saifullin, V.M. Larionov, A.V. Busarov, V.V. Busarov, Journal of Physics: Conference Series. – 2016. - 669 (1), № 012037.

10. G. F. Knorre, K. M. Aref'ev, A G Blokh 1966 Russia B. Theory of combustor processes 1042

Authors of the publication

Larionov Viktor Mihailovich – professor Kazan Federal University.

Saifullin Emil Rinatovich – post graduate Kazan Federal University.

Nazarychev Sergey Aleksandrovich – post graduate Kazan Federal University.

Malahov Alexsey Olegovich - post graduate Kazan Federal University.

Vankov Yuriy Vitalevich – professor Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

05 декабря 2016 г.