

Исследование влияния концентрации водорода в топливной смеси на характеристики парогазовых установок

Постникова М.С., Куроптев Д.Б.

Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”

Research of the hydrogen concentration effect in a fuel mixture on the combined cycle power plant characteristics

Postnikova M.S., Kuroptev D.B.

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”

Развитие водородной энергетики является возможным способом снижения выбросов вредных веществ в атмосферу при производстве электроэнергии. Для его реализации требуется разработка энергетических объектов, способных работать на экологически безопасном топливе. При этом с технологической точки зрения проще реализовать постепенный переход на использование водорода в энергоустановках за счет сжигания метано-водородных смесей. В настоящей работе изложены результаты термодинамических исследований влияния химического состава метано-водородной смеси на показатели работы парогазового энергоблока. Показано, что увеличение массовой доли водорода в топливной смеси от 0 до 80% приводит к снижению числа Воббе на 42% и увеличению собственных нужд энергоблока практически в 3 раза. Выявлено, что отпускаемая электрическая мощность газотурбинной установки возрастает на 1,8%, а парогазовой установки - на 1,3%.

The development of hydrogen energy is one of the most promising ways to reduce polluting emissions into the atmosphere during electricity production. Its implementation requires the development of power plants operating on environmentally cleaner fuel. This paper presents the results of thermodynamic research of the effect of the methane-hydrogen mixture chemical composition on the combined cycle power plant energy parameters. It is shown that an increase in the mass fraction of hydrogen in the fuel mixture from 0 to 80% leads to a decrease in the Wobbe number by 15% and an increase the auxiliary power consumption by almost 3 times. It was revealed that the released electric power of a gas turbine plant increases by 1.8%, and a combined-cycle gas plant-by 1.3%.

Ключевые слова: метано-водородная смесь, парогазовая установка, газовая турбина, математическая модель.

Key words: methane-hydrogen mixture, combined cycle power plant, gas turbine, mathematical model.

Сегодня одним из основных мировых трендов развития энергетической отрасли является переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Широкое распространение получили ветряные и солнечные электростанции. На данный момент совокупная генерация электроэнергии с помощью ВИЭ в мире составляет всего 3 % [1, 2]. Однако в ближайшие несколько десятилетий многие страны Европы, Япония, США, Канада и Китай планируют существенно увеличить их количество в обеспечение снижения выбросов токсичных веществ и парниковых газов при производстве электроэнергии [3, 4].

Для реализации столь масштабной амбициозной задачи потребуется создание систем аккумулирования, обеспечивающих выравнивание графиков производства и потребления энергии [5, 6]. Структура существующих энергетических систем будут подвержена существенному преобразованию.

Одним из возможных сценариев развития энергетической отрасли является переход на водородную энергетику [7, 8]. Популярная концепция подразумевает производство водорода за счет ВИЭ в период провалов нагрузки с последующей полезной утилизацией запасенной энергии. Транспортировку водорода от места производства до места потребления возможно осуществить по существующим газопроводам [9, 10]: водород будет подмешиваться к природному газу. Затем топливная смесь будет направляться на тепловые электрические станции для последующего сжигания с целью производства электроэнергии.

Поскольку стоимость произведенного по описанной выше технологии водорода будет значительной, его последующее сжигание целесообразно производить на наиболее эффективных установках, работающих по комбинированному циклу. В свою очередь, изменение химического состава топлива, поступающего в камеру сгорания (КС) будет сопровождаться отклонением показателей работы всех элементов тепловой схемы: камеры сгорания, газовой турбины (ГТ), котла-утилизатора (КУ) и паротурбинной установки (ПТУ).

Целью настоящей работы является анализ влияния соотношения компонентов метано-водородной смеси на основные энергетические характеристики парогазовой установки (ПГУ). Для ее решения разработана математическая модель ПГУ, работающей на топливной смеси, с использованием которой произведена серия термодинамических расчетов.

Описание объекта и методики проведения исследований

Объектом исследований являлась тепловая схема парогазовой установки, работающая на метано-водородной смеси, схема которой приведена на рисунке 1. За прототип газовой турбины была взята модель Mitsubishi Heavy Industries M701G2 с начальной температурой рабочей среды, равной 1410°C . Принято, что метано-водородная смесь подается на ТЭС по газовой магистрали при давлении $0,7\text{ МПа}$ и температуре 15°C и затем повышает свое давление на $2,5\text{ МПа}$ в дожимном компрессоре. Продукты сгорания проходят через охлаждаемую газовую турбину и затем направляются в двухконтурный котел-утилизатор, служащий для генерации пара для паротурбинной установки. Исходные данные для моделирования тепловой схемы представлены в таблице 1.

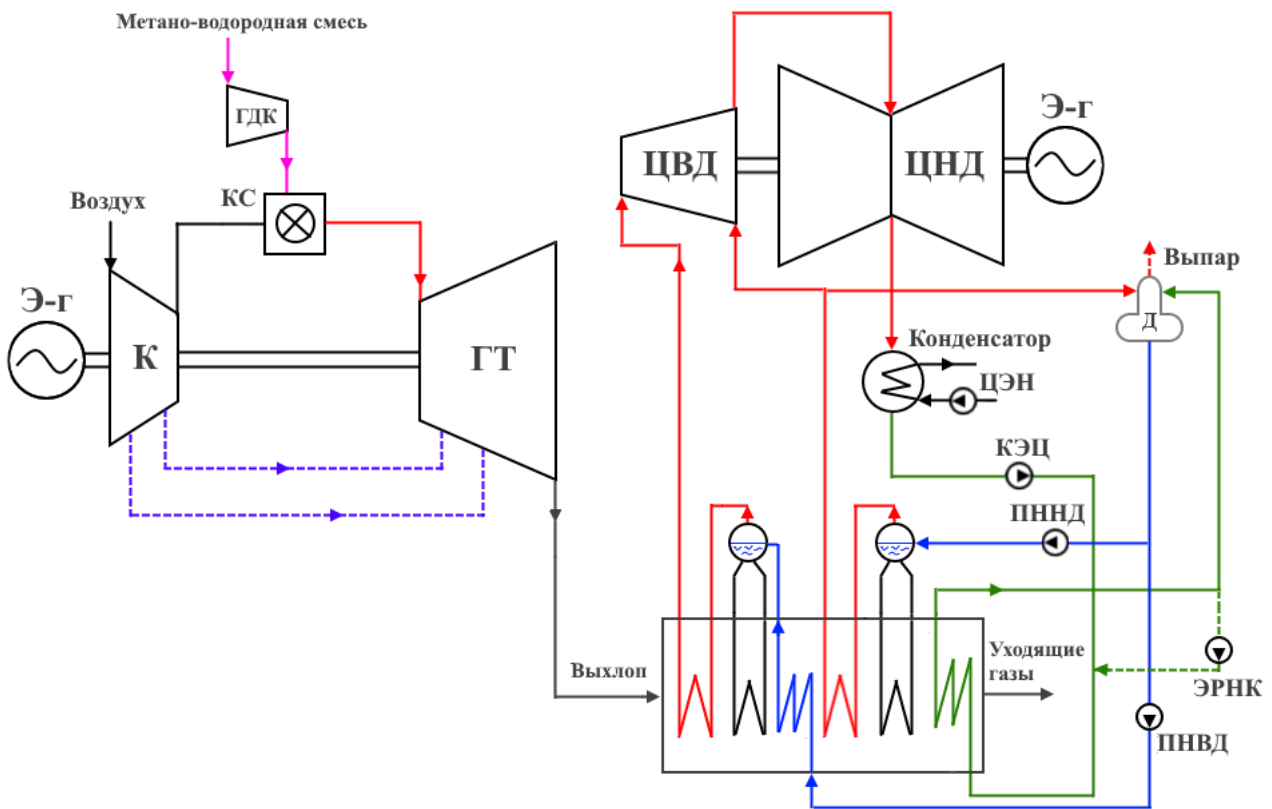


Рисунок 1 – Принципиальная тепловая схема ПГУ на метано-водородной смеси.

Для моделирования тепловой схемы ПГУ была разработана соответствующая математическая модель с использованием программы MS Excel. Методика расчета охлаждаемой газовой турбины подробно описана в [11-12]. Расчеты теплофизических свойств рабочей среды производились с использованием базы теплофизических свойств NIST REFPROP.

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования.

Параметр	Размерность	Значение параметра
Расход воздуха на входе в компрессор	кг/с	740
Температура /давление воздуха на входе в компрессор	°С / кПа	15 / 101,3
Температура рабочей среды на входе в газовую турбину	°С	1400
Степень сжатия в компрессоре	-	21
Внутренний относительный КПД газовой турбины / компрессора	%	89 / 88
Механический КПД / КПД электрогенератора / КПД транспорта теплоты	%	99 / 99 / 99
Относительный расход на охлаждение	%	13,7
Низшая теплота сгорания метана / водорода	МДж/кг	50,25 / 121
Давление пара высокого/ низкого давления на входе в паровую турбину	МПа	7 / 0,7
Давление в деаэраторе / конденсаторе	МПа	0,58 / 0,004
Температура на входе в ГПК	°С	60

Методика расчета энергетических показателей ПГУ была следующей.

Критерий Воббе определялся по формуле:

$$W_{OH} = \frac{Q_n^p}{\sqrt{\rho_{mz} / \rho_{в.н.у}}}, \quad (1)$$

где Q_n^p – объемная низшая рабочая теплота сгорания топлива, МДж/нм³; ρ_{mz} – плотность топливного газа при нормальных условиях, кг/нм³; $\rho_{в.н.у.}$ – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/нм³.

Мощность, затрачиваемая на собственные нужды:

$$N_{CH} = N_{ГДК} + N_{ПЭН\ вд} + N_{ПЭН\ нд} + N_{КЭН} + N_{ЦЭН} + N_{ЭНРК}, \quad (2)$$

где $N_{ГДК}$ – мощность, затрачиваемая на привод газодожимных компрессоров, МВт; $N_{ПЭН\ вд}$ и $N_{ПЭН\ нд}$ – мощность, затрачиваемая на привод питательных электронасосов высокого и низкого давлений, МВт; $N_{КЭН}$ – мощность, затрачиваемая на привод конденсатных электронасосов, МВт; $N_{ЦЭН}$ – мощность, затрачиваемая на привод циркуляционных электронасосов конденсатора, МВт; $N_{ЭНРК}$ – мощность, затрачиваемая на привод электронасосов рециркуляции конденсата котла-утилизатора, МВт.

Отпускаемая мощность определялась как:

$$\begin{aligned} N_{ГТУ}^{ум} &= (N_{ГТ} - N_{К}) \cdot \eta_{ЭГ} - N_{ГДК}; \\ N_{ПСУ}^{ум} &= N_{ПТ} \cdot \eta_{ЭГ} - (N_{ПЭН\ вд} + N_{ПЭН\ нд} + N_{КЭН} + N_{ЦЭН} + N_{ЭНРК}); \\ N_{ПГУ}^{ум} &= N_{ГТУ}^{ум} + N_{ПСУ}^{ум}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $N_{ГТ}$ – мощность, вырабатываемая газовой турбиной, МВт; $N_{К}$ – мощность, затрачиваемая на привод компрессора газотурбинной установки, МВт; $\eta_{ЭГ}$ – КПД электрогенератора, %; $N_{ПТ}$ – мощность, вырабатываемая паровой турбиной, МВт.

Тепловая мощность, подведенная в камеру сгорания газотурбинной установки:

$$Q_{КС} = V_{m2} \cdot Q_n^p \quad (4)$$

где V_{m2} – объемный расход топливного газа при нормальных условиях, м^3 .

Тепловая мощность котла-утилизатора:

$$Q_{KV} = G_z \cdot (I_d - I_{yx}), \quad (5)$$

где G_z – расход выхлопных газов, кг/с ; I_d – энтальпия выхлопных газов на входе в котел-утилизатор, кДж/кг ; I_{yx} – энтальпия выхлопных газов на выходе из котла-утилизатора, кДж/кг .

КПД котла-утилизатора:

$$\eta_{KV} = \frac{I_d - I_{yx}}{I_d - I_{нв}}, \quad (6)$$

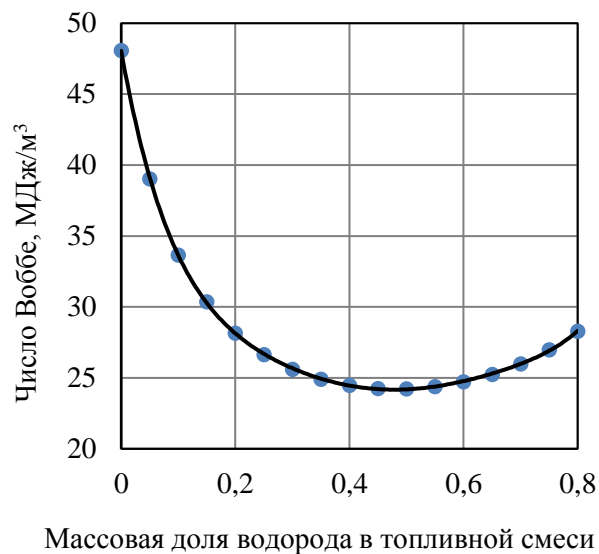
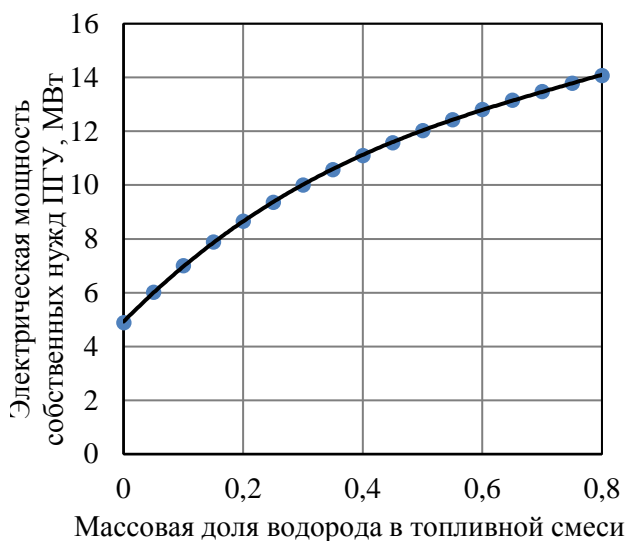
где $I_{нв}$ – энтальпия выхлопных газов при температуре наружного воздуха, равной 15°C , кДж/кг .

КПД нетто установок были определены по формулам:

$$\begin{aligned} \eta_{ГТУ}^{nm} &= \frac{N_{ГТУ}^{nm}}{Q_{КС}} \cdot 100\%; \\ \eta_{ПСУ}^{nm} &= \frac{N_{ПСУ}^{nm}}{Q_{KV}} \cdot \eta_{KV}; \\ \eta_{ГТУ}^{nm} &= \frac{N_{ПГУ}^{nm}}{Q_{КС}} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (7)$$

Результаты термодинамических исследований

По результатам моделирования установлено, что увеличение содержания водорода в топливе сопровождается увеличением числа Воббе, собственных нужд энергоблока, а также снижением температуры рабочей среды на выхлопе газовой турбины (рисунок 2). Увеличение доли собственных связано с ростом объемного расхода топливной смеси, приводящего к увеличению мощности газодожимных компрессоров.

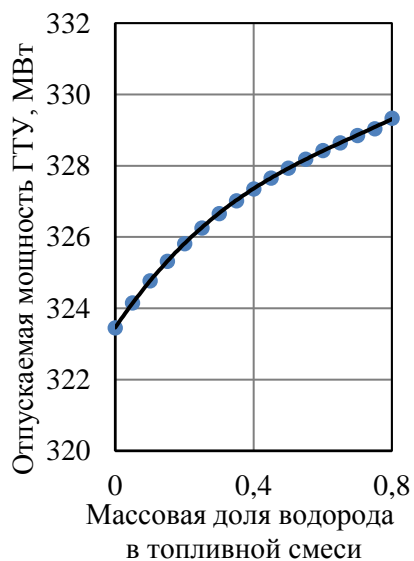


а) Изменение электрической мощности собственных нужд ПГУ

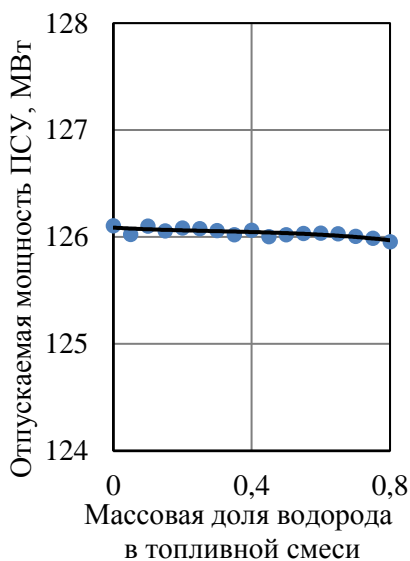
б) Изменение температуры выхлопа газовой турбины

Рисунок 2 – Влияние массовой доли водорода на показатели работы ПГУ

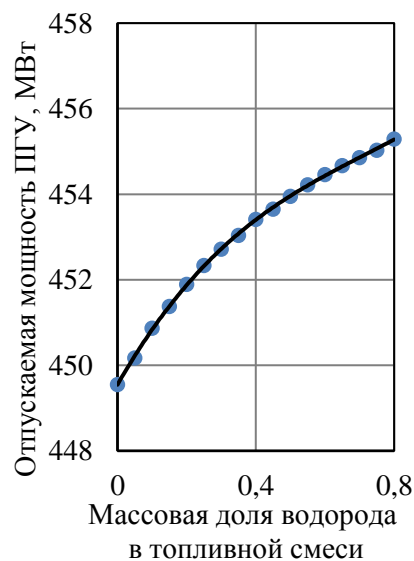
Выявлено, что при увеличении массового содержания водорода в топливной смеси от 0 до 80% отпускаемая электрическая мощность ГТУ увеличивается с 323,4 до 329,3 МВт, отпускаемая электрическая мощность ПСУ снижается со 126,1 до 126,0 МВт, а отпускаемая электрическая мощность ПГУ возрастает с 449,5 до 455,3 МВт.



а) ГТУ



б) ПСУ



в) ПГУ

Рисунок 3 – Зависимость отпускаемой мощности от массовой доли водорода

В свою очередь, КПД нетто ГТУ возрастает с 40,41 до 40,48%, КПД нетто ПСУ снижается с 27,44 до 27,39%, а КПД нетто ПГУ уменьшается с 56,17 до 55,97%.

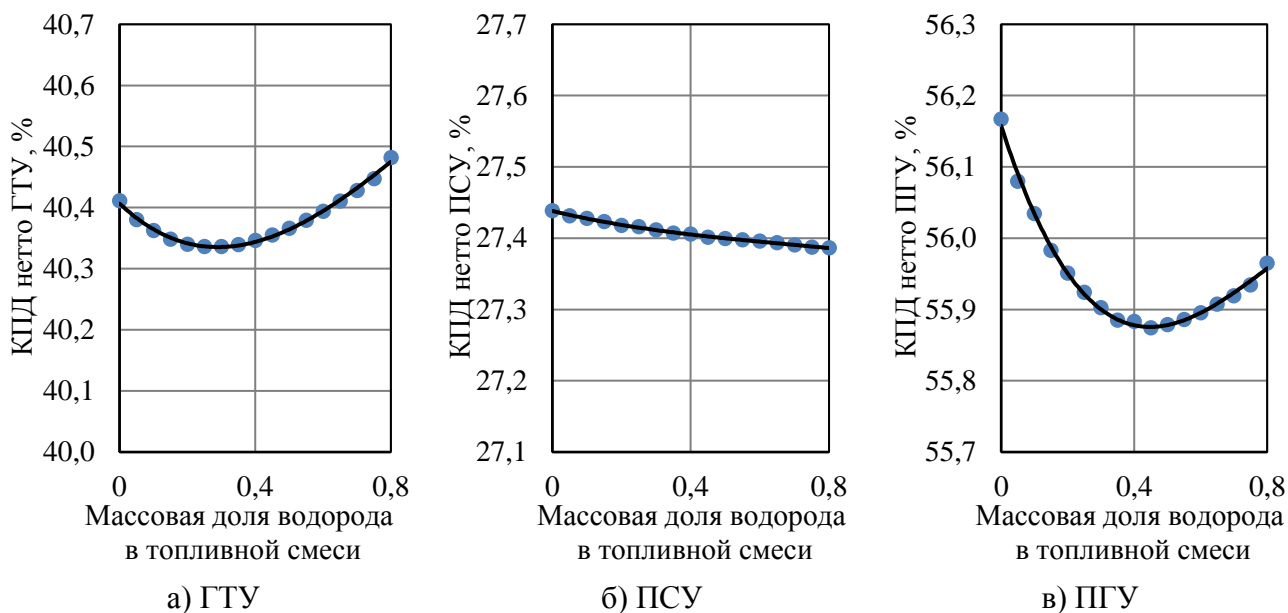


Рисунок 4 – Зависимость КПД нетто от массовой доли водорода

Выводы

На основе результатов математического моделирования тепловой схемы парогазовой установки, работающей на метано-водородной смеси выявлено влияние химического состава топлива на энергетические показатели энергоблока. В частности, установлено, что увеличение массовой доли водорода в топливной смеси от 0 до 80% приводит к снижению числа Воббе на 15% и увеличению собственных нужд энергоблока практически в 3 раза. Выявлено, что отпускаемая электрическая мощность газотурбинной установки возрастает на 1,8%, а парогазовой установки - на 1,3%.

В дальнейших исследованиях следует проанализировать влияние увеличения водяного пара на эффективность теплогидравлических процессов, протекающих в газовой турбине и необходимость увеличения расхода хладагента.

Благодарность

Исследование проведено в НИУ “МЭИ” при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2020-0020.

Список литературы

- [1] Wang, H., Lei, Z., Zhang, X., Zhou, B., Peng, J.. A review of deep learning for renewable energy forecasting. *Energy Conversion and Management*, **198**, 2019, 111799.
- [2] Dudin, M. N., Frolova, E. E., Protopopova, O. V., Mamedov, A. A., Odintsov, S. V. Study of innovative technologies in the energy industry: nontraditional and renewable energy sources. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, **6**(4), 2019, pp. 1704-1713.
- [3] Kakoulaki, G., Kougiyas, I., Taylor, N., Dolci, F., Moya, J., Jäger-Waldau, A. Green hydrogen in Europe—A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Conversion and Management*, 2020, 113649.
- [4] Iida, S., Sakata, K. Hydrogen technologies and developments in Japan. *Clean Energy*, **3**(2), 2019, pp. 105-113.
- [5] Zsiborács, H., Baranyai, N. H., Vincze, A., Zentkó, L., Birkner, Z., Máté, K., & Pintér, G. Intermittent renewable energy sources: The role of energy storage in the european power system of 2040. *Electronics*, **8**(7), 2019, 729.
- [6] Terlouw T., AlSkaif T., Bauer C. and Sark W. Optimal energy management in all-electric residential energy systems with heat and electricity storage. *Applied Energy*, **254**, 2019, pp. 113580
- [7] Chapman A., Itaoka K., Hirosea K., Davidson T., Nagasawa K., Lloyd A., Webber M., Kurban Z., Managie S., Tamaki T., Lewis M., Hebner R. and Fujii Y. A review of four case studies assessing the potential for hydrogen penetration of the future energy system. *International journal of hydrogen energy*, **44** (13), 2019, pp. 6371-6382.
- [8]. Abe J. O., Popoola A.P.I., Ajenifuja E. and Popoola O.M. et al. Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*. **44** (29), 2019, pp. 15072-15086.
- [9] Moradi R. and Groth K. M. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. **44** (23), 2019, pp. 12254-12269.
- [10] Timmerberg S. and Kaltschmitt M. Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central Europe as blend in existing pipelines—Potentials and costs. *Applied energy*. **237**, 2019, pp. 795-809.
- [11] Киндра В.О., Постникова М.С., Наумов В.Ю. и Ковалев Д.С. Разработка математической модели охлаждаемой газотурбинной установки. *Инновации. Наука. Образование*. **21**, 2020, pp. 1287-1297.
- [12] Rogalev A., Grigoriev E., Kindra V., Rogalev N. Thermodynamic optimization and equipment development for a high efficient fossil fuel power plant with zero emissions //Journal of Cleaner Production. **236**, 2019. pp. 117592.