

Средний коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{\text{конв}} = \frac{4}{3} \alpha_{x=l} = \frac{4}{3} 0,40 \sqrt[4]{\frac{c_p \rho^2 g \beta \vartheta_c \lambda^3}{\mu l}} = 0,533 \sqrt[4]{\frac{c_p \rho^2 g \beta \vartheta_c \lambda^3}{\mu l}}, \quad (9)$$

где $\alpha_{x=l}$ – местный коэффициент теплоотдачи в точке, определяемой координатой $x=l$.

Средняя теплоотдача вертикальной стенки для $t_c = \text{const}$ при ламинарном и ламинарно волновом гравитационном течении пленки конденсата в критериальной форме будет:

$$\text{Nu}_l = 0,533 (\text{Gr}_l \text{Pr})^{0,25}. \quad (10)$$

В результате решения задачи гидродинамики и теплообмена гравитационно стекающей пленки конденсата по вертикальной поверхности при ламинарном и ламинарно волновом режиме течения при конденсации неподвижного пара получены уравнения для определения локальных и средних по высоте стенки толщины пленки конденсата и конвективных коэффициентов теплоотдачи.

Л и т е р а т у р а

1. Павленко, А. Н. Теплообмен и кризисные явления в стекающих пленках жидкости при испарении и кипении / А. Н. Павленко, Н. И. Печеркин, О. А. Володин. – Изд-во Сибир. отделения Российской академии наук. – Новосибирск, 2016. – 190 с.
2. Гогонин, И. И. Теплообмен при кипении жидкости в пленке, движущейся под действием силы тяжести / И. И. Гогонин // ИФЖ. – 2010. – № 4. – С. 821–826.
3. Гимбутис, Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости / Г. Гимбутис. – Вильнюс : Москлас, 1988. – 232 с.
4. Hydrodynamics and heat transfer of vertical falling liquid films / S. Ishigai, S. Nakanishi, T. Koizumi, Z. Oyabi // Bull. JSME. – 1972. – Vol. 15, N 83. – P. 594.
5. Ягов, В. В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях / В. В. Ягов. – Москва : МЭИ, 2014. – 542 с.
6. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел – Москва : Энергоиздат, 1981. – 415 с.
7. Лабунцов, Д. А. Механика двухфазных систем / Д. А. Лабунцов, В. В. Ягов – Москва : МЭИ, 2007. – 384 с.

УДК 658.261:620.97

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИГЕНЕРАЦИОННЫХ ТУРБОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ НИЗКОКИПЯЩИХ РАБОЧИХ ТЕЛ

А. В. Овсянник, В. П. Ключинский

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Представлена классификация агрегатов для синтеза полигенерационных установок, структура математической модели их расчета, а также технико-экономические показатели полигенерационных установок (установок, позволяющих получать электрическую энергию, теплоту, холод и диоксид углерода).

Ключевые слова: полигенерация, производство диоксида углерода, утилизация низкопотенциальной теплоты.

MODELING AND OPTIMIZATION OF MULTIGENERATIONAL TURBINE INSTALLATIONS BASED ON LOW-BOILING WORKING FLUIDS

A. V. Ovsyannik, V. P. Klyuchinsky

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The paper presents the classification of aggregates for the synthesis of polygeneration plants, the structure of the mathematical model of their calculation, as well as the technical and economic indicators of polygeneration plants (installations allowing to obtain electric energy, heat, cold and carbon dioxide).

Keywords: polygeneration, carbon dioxide production, utilization of low-potential heat.

В последнее время учеными уделяется большое внимание полигенерации [1–3]. Такого рода установки имеют как энергетические, так и экономические преимущества. Одной из разновидностей полигенерационных установок могут служить установки, которые позволяют одновременно получать электрическую, тепловую энергию, холод и диоксид углерода. Таким образом, целью работы является создание, расчет и анализ полигенерационных установок. Создание таких схем полигенерации производилось путем синтеза агрегатов представленных в табл. 1.

Таблица 1

Классификация агрегатов для синтеза схем полигенерации

Ресурсы		
Природный газ	Тепловые ВЭР	Топлива с низкой теплотворной способностью
Установка для преобразования энергетических ресурсов		
Газотурбинная установка	Котел-утилизатор	Котлоагрегат
Установка с низкопотенциальным подводом теплоты для получения электрической энергии (турбоустановка)		
На насыщенном паре	На перегретом паре	С промежуточным перегревом
Установка для преобразования материальных потоков/ получения холода		
Парокомпрессионная холодильная установка	Установка по производству углекислоты и холода	

Для проведения термодинамического анализа разработана математическая модель полигенерационных турбоустановок [3]. Структура математической модели полигенерационной установки представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура математической модели полигенерационной установки

Таблица 2

Результаты расчета полигенерационных установок

Показатель	Рабочее тело									
	R744				R410A			R600A		R718
	Сбк	Свк	С пп	Сбк	Свк	С пп	Сбк	Свк	С пп	Сбк
Отпуск электрической энергии, ГВт · ч/год	1,0	10,4	11,8	8,6	12,3	13,7	12,2	14,1	15,1	11,3
Отпуск тепловой энергии МВт · ч/год	7372	7372	7372	7372	7372	7372	7372	7372	7372	7372
Отпуск холод (+4 °С) МВт · ч/год	1489	1489	1489	1489	1489	1489	1489	1489	1489	1489
Отпуск холод (–18 °С) МВт · ч/год	2234	2234	2234	2234	2234	2234	2234	2234	2234	2234
Отпуск жидкой CO ₂ , т/год	1415	1415	1415	1415	1415	1415	1415	1415	1415	1415
Отпуск газообр. CO ₂ , т/год	2830	2830	2830	2830	2830	2830	2830	2830	2830	2830
Экономия, тыс. руб./год	2491	5202	5607	4668	5735	6141	5735	6247	6546	5458
Стоимость полигенерационной установки, руб.	2370	7765	8617	6162	6888	7553	7900	8253	8787	7236
Эксплуатационные расходы, тыс. руб./год	213	699	776	555	620	680	711	743	791	651
Затраты на топливо, тыс. руб./год	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625
Простой (статический) срок окупаемости, лет	3,6	2,7	2,7	2,5	2,0	2,0	2,3	2,1	2,1	2,3
Внутренняя норма доходности, %	27,3	37,0	37,1	40,3	50,7	50,8	43,0	47,0	47,1	43,9
Динамический срок окупаемости, лет	5,7	3,7	3,7	3,3	2,5	2,5	3,1	2,8	2,8	3,0
Чистый дисконтированный доход, млн руб.	1,72	10,2	11,5	9,4	14,9	16,5	13,4	16,0	17,1	12,7

На основании разработанной математической модели произведен эксергетический и технико-экономический анализ полигенерационных установок с котлоагрегатом. В качестве рабочих тел рассматривались углекислота ($R744$), изобутан ($R600A$), $R410A$ и вода. ($R718$). В табл. 2 представлены результаты расчета наиболее привлекательных из синтезированных схем полигенерации со следующими сокращения: Сбк – ТУ с субкритическими параметрами НКРТ; Свк – ТУ со сверхкритическими термодинамически оптимальными параметрами НКРТ; Спп – ТУ с промежуточным перегревом рабочего тела.

Предложенные в работе полигенерационные установки позволяют одновременно получать электрическую энергию, теплоту, холод и диоксид углерода в жидком и газообразном виде, что влечет следующие преимущества:

1. Универсальность и эффективность за счет возможности утилизации низкопотенциальных энергетических ресурсов.

2. Снижение выбросов диоксида углерода, за счет его абсорбции из продуктов сгорания и использования для технологических (на промышленных предприятиях) или коммерческих нужд.

3. Хорошие технико-экономические показатели (статический срок окупаемости не превышает 4 лет, внутренняя норма доходности варьируется от 27,3 до 50,8 % и др.).

Л и т е р а т у р а

1. Клименко, А. В. Особенности комбинированного производства электроэнергии тепла и холода на базе парогазовой установки / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. – 2015. – № 3. – С. 11–15.
2. Овсянник, А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 3 (65). – С. 263–275.
3. Патент 2530971 RU, МПК F01K 23/06. Тригенерационная установка с использованием парогазового цикла для производства электроэнергии и парокон-прессорного теплонасосного цикла для производства тепла и холода / Агабабов В. С [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт». – № 2013137038/06; заявлено 08.08.2013; опубл. 20.10.2014.
4. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4. – С. 108–115.

УДК 628.1

СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОДОИСТОЧНИКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА ГОМЕЛЯ

Е. Н. Макеева, К. А. Агунович

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Изучен химический состав воды артезианских скважин из межпластовых водных слоев, используемых для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Гомеля. Проведена оценка качества проб воды из скважин глубиной 100, 140 и 290 м. Выявлена зависимость показателей качества воды от глубины водоносного пласта. Определено повышенное содержание общего железа и величины мутности в двух пробах воды подземных