

КОГЕНЕРАЦИОННЫЕ ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ НА ПРОДУКТАХ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

А.С. Сельницын

selnitsynas@mail.ru

SPIN-код: 9927-4177

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Изложены проблемы утилизации твердых бытовых отходов (ТБО). В качестве технологичного решения предложен эффективный метод утилизации ТБО путем предварительной сортировки с целью извлечения вторичного сырья для рециклинга и последующей газификации. Проведен обзор и выполнен анализ энергетических установок малой мощности. Обоснован выбор газотурбинных установок (ГТУ) в качестве преобразователя химической энергии синтез-газа в электрическую и тепловую энергию. Выполнен сравнительный анализ схем, работающих на продуктах газификации ТБО традиционной ГТУ малой мощности и ГТУ с измененной последовательностью процессов. Использование сухой очистки синтез-газа при электрической мощности ГТУ 300 кВт, степени повышения давления 4,5, температуре в камере сгорания 1173 К позволяет повысить электрический КПД ГТУ с измененной последовательностью процессов на 6 % по сравнению с мокрой очисткой.

Ключевые слова

Газификация, рециклинг, газотурбинный двигатель, газотурбинная установка, утилизация, возобновляемые источники энергии, твердые бытовые отходы

Поступила в редакцию 27.11.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Рост численности населения и объемов потребления во всем мире приводит к существенному увеличению объемов образования твердых бытовых отходов (ТБО). В условиях урбанизации проблема образования и утилизации ТБО является одной из самых важных. В настоящее время наблюдается повышенный интерес к производству энергии и вторичного сырья из ТБО, а не к их санитарному захоронению на мусорных полигонах. Европейский Союз поставил перед собой цель сократить объемы захоронения биоразлагаемых ТБО на 65 %. Директивы ЕС стимулировали строительство новых предприятий по переработке отходов с получением энергии (WTE) и модернизацию существующих [1]. Основным способом утилизации ТБО в России является захоронение на полигонах [2].

Численность населения в Российской Федерации за последние 5 лет увеличилась почти на 4 млн человек, объемы потребления также возросли [3]. Следовательно, общий объем ТБО имеет тенденцию к росту. Полигоны по захоронению ТБО занимают большие земельные площади и вызывают значительную

эмиссию свалочного газа. В связи с высоким содержанием метана его принято относить к парниковым газам. Парниковые газы оказывают антропогенное воздействие на экологическую ситуацию и являются причиной возникновения озоновых дыр, вследствие чего остро встает вопрос утилизации ТБО, а не захоронения их на полигонах [4].

Существуют различные подходы к решению проблемы по утилизации ТБО. Одним из таких подходов является раздельный сбор ТБО и дальнейший рециклинг по отдельным видам отходов, а по другим — производство синтез-газа и дальнейшая его утилизация. Однако в РФ в настоящее время отсутствует нормативная база, которая стимулировала или обязывала бы граждан вести раздельный сбор ТБО. Большинство граждан не осуществляют раздельный сбор отходов, поскольку в РФ не налажена массовая система по их раздельному сбору.

В настоящее время эффективным методом утилизации ТБО является их предварительная сортировка (извлечение вторичного сырья для рециклинга) и дальнейшая газификация [5]. При газификации ТБО происходит выделение синтез-газа. Синтез-газ, полученный таким способом, является экологичным видом топлива. Проведенный с учетом изложенных в работах [6, 7] данных анализ показал рациональность использования ГТУ для преобразования химической энергии синтез-газа в электрическую и тепловую энергию.

Целью рассматриваемой работы является выбор схемы газотурбинных установок (ГТУ) малой мощности на продуктах газификации ТБО и определение оптимальных параметров цикла установки.

ГТУ малой мощности. Использование синтез-газа из ТБО происходит, как правило, в ГТУ малой мощности (20...400 кВт). В конце 1990-х годов в мире началось серийное производство микроГТУ, на российском рынке представленных фирмами Capstone Turbine Corporation (CPST), Toyota Turbine And Systems Inc., Calnetix Technologies, Bowman Power Group, Wilson TurboPower Inc., Turbec R&D AB, Nissan Motors Co., UTC Power и др. [8]. Анализ импортных серийно выпускаемых ГТУ малой мощности показал, что они различаются по конструкции, термодинамическим параметрам, мощности, видам используемого топлива [9–12]. Сходство в том, что они имеют регенератор, дожимной компрессор для повышения давления топлива перед камерой сгорания и работают по классической схеме ГТУ.

Наиболее часто для утилизации теплоты продуктов сгорания за турбиной применяют регенераторы — газоздушные теплообменники. Использование регенерации в схеме ГТУ позволяет повысить КПД установки на 4...6 % и снизить расход топлива. Оптимальная степень повышения давления уменьшается до значений 4...7, снижаются также число ступеней и стоимость лопаточных машин. При увеличении степени регенерации до значений выше 0,85 массогабаритные характеристики рекуператора существенно увеличиваются, а конкурентоспособность установки снижается по причине значительного удорожания рекуператора [13, 14].

Поскольку синтез-газ после процесса газификации имеет низкое давление, для применения синтез-газа в ГТУ традиционной схемы необходимо установить дожимной компрессор, повышающий давление топлива перед камерой сгорания до необходимых значений. На компримирование топливного газа расходуется дополнительная энергия и, соответственно, себестоимость производства электрической и тепловой энергии возрастает. В связи с этим целесообразно рассмотреть другие схемы регенеративной ГТУ малой мощности.

Схема когенерационной ГТУ с измененной последовательностью процессов. Рассмотрим схему ГТУ с измененной последовательностью процессов, давление в камере сгорания которой практически равно атмосферному. В этом случае, как правило, отпадает необходимость в предварительном компримировании топливного газа. На рис. 1 представлена схема когенерационной ГТУ с измененной последовательностью процессов.

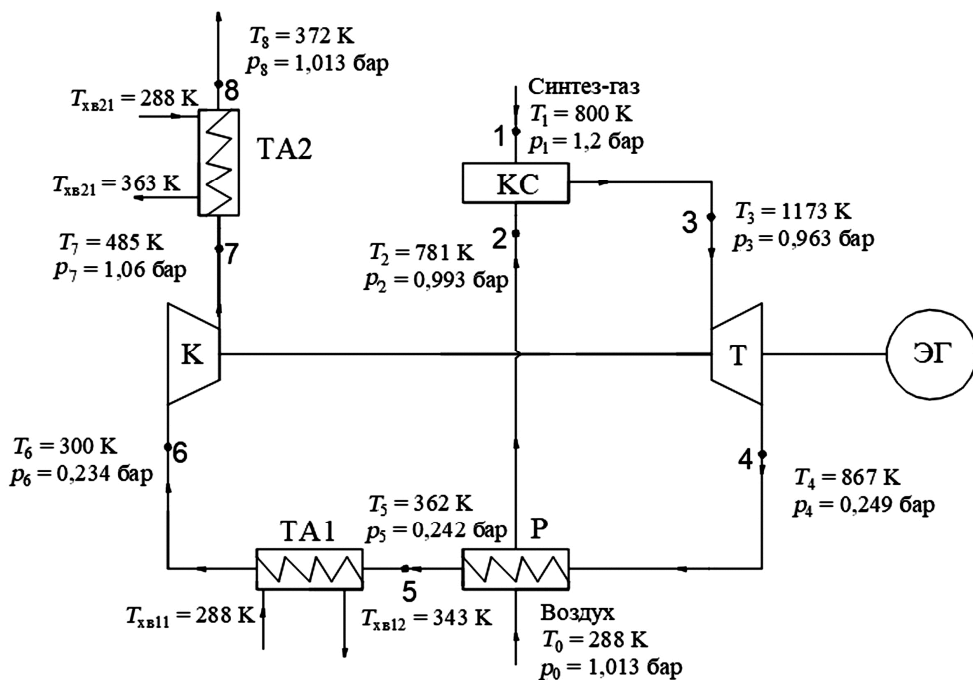


Рис. 1. Схема когенерационной ГТУ с измененной последовательностью процессов:

КС — камера сгорания; Т — турбина; К — компрессор; Р — регенератор; ЭГ — высокоскоростной электрогенератор; ТА1 — теплообменный аппарат (газоохладитель); ТА2 — теплообменный аппарат; T_0, p_0 — температура и давление воздуха в окружающей среде; T_1, p_1 — температура и давление синтез-газа на входе в камеру сгорания; T_2, p_2 — температура и давление воздуха после регенератора; T_3, p_3 — температура и давление газа после камеры сгорания; T_4, p_4 — температура и давление газа после турбины; T_5, p_5 — температура и давление газа после регенератора; T_6, p_6 — температура и давление газа после газоохладителя ТА1; T_7, p_7 — температура и давление газа после компрессора; T_8, p_8 — температура и давление газа после теплообменного аппарата ТА2; $T_{\text{хв}11}$ — температура воды, поступающей на охлаждение в газоохладитель ТА1; $T_{\text{хв}12}$ — температура подогретой воды после ТА1; $T_{\text{хв}21}$ — температура воды, поступающей на охлаждение в газоохладитель ТА2; $T_{\text{хв}22}$ — температура подогретой воды после ТА2

Когенерационная ГТУ на продуктах газификации ТБО работает следующим образом. Воздух атмосферного давления поступает в регенератор, в котором осуществляется подогрев воздуха. После регенератора подогретый воздух поступает в камеру сгорания, в которую также без предварительного сжатия подается синтез-газ. В камере происходит процесс горения топливного газа, затем продукты сгорания направляются в турбину и совершают работу. После турбины продукты сгорания поступают в регенератор и отдают теплоту воздуху, далее они направляются в газоохладитель. Охлажденные продукты сгорания поступают в компрессор, где происходит процесс сжатия и тем самым создается вакуум в газовом тракте. После компрессора продукты сгорания проходят через теплообменник, подогревают воду и выбрасываются в окружающую среду.

Подогретую в теплообменнике воду можно использовать для нужд теплоснабжения и горячего водоснабжения. При необходимости уходящие газы ГТУ можно использовать для сушки ТБО.

Данная ГТУ не имеет редуктора, поскольку при больших частотах вращения ротора использовать редуктор нецелесообразно. В качестве преобразователя механической энергии в электрическую используется высокочастотный электрический генератор, частота вращения ротора которого почти не зависит от нагрузки. Ротор высокочастотного генератора представляет собой вал, изготовленный из магнитного материала, на котором установлены постоянные магниты с высокой коэрцитивной силой. При запуске ГТУ генератор исполняет роль стартера. В статоре высокочастотного генератора используется охлаждение [15].

В качестве топлива для данной ГТУ используется синтез-газ, полученный путем газификации ТБО. Расчетный состав синтез-газа оценивали путем усреднения показателей морфологического состава ТБО на полигоне. Используя морфологический состав ТБО и зная состав отдельных компонентов, можно определить энергетический потенциал и процентный состав элементарных компонентов в составе ТБО.

После очистки при нормальных условиях синтез-газ имеет следующий расчетный состав (объемн. %) [16]: CO — 24,20, CO₂ — 5,41, H₂ — 45,86, N₂ — 0,47, H₂O — 24,0. Низшая теплотворная способность данного газа при нормальных условиях составляет $Q_{\text{н}}^P = 8,5$ МДж/кг, стехиометрический коэффициент $l_0 = 5,95$ кг/кг, давление синтез-газа после очистки $p_1 = 1,2$ бар [17].

Численные исследования когенерационной ГТУ. Анализ работ [18–20] показал, что при одинаковых исходных данных схема регенеративной ГТУ с измененной последовательностью процессов незначительно уступает по термодинамическим характеристикам классической схеме ГТУ с дожимным топливным компрессором, но имеет ряд полезных преимуществ. К основным преимуществам относится то, что процесс сжигания синтез-газа реализуется при атмосферном давлении, что позволяет не использовать дожимной компрессор. Газотурбинная установка с измененной очередностью процессов является более технологичной по сравнению с традиционной ГТУ малой мощности. Синтез-

газ, полученный путем газификации ТБО, имеет высокое содержание водорода, поэтому при сжигании его в ГТУ традиционной схемы может возникнуть детонация, а в ГТУ с измененной последовательностью процессов этого можно избежать, поскольку процесс сгорания происходит при атмосферном давлении. Более низкое давление в цикле способствует повышению газодинамической эффективности узлов ГТУ с измененной последовательностью процессов.

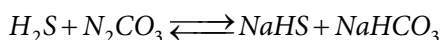
В работе проведен расчет цикла ГТУ с измененной последовательностью процессов на основе методики, изложенной в [18, 19]. Исходные данные ГТУ, принятые при анализе, представлены ниже.

Исходные данные для расчета ГТУ с измененной последовательностью процессов

Температура в камере сгорания T_3 , К	1173
Степень регенерации σ	0,85
Температура воды на входе в теплообменный аппарат $T_{хв1}$, К	288
Температура воды на выходе из теплообменного аппарата $T_{хв1}$, К	363
Температура входа продуктов сгорания в компрессор T_6 , К	300
Политропный КПД турбины по параметрам торможения $\eta_{тн}^*$	0,89
Политропный КПД компрессора по параметрам торможения $\eta_{кп}^*$	0,86
Коэффициент сохранения полного давления в теплообменнике и в регенераторе по воздушной стороне $\sigma_{рв}$	0,98
Коэффициент сохранения полного давления в теплообменнике и в регенераторе по газовой стороне $\sigma_{рг}$	0,97
Коэффициент сохранения полного давления при входе в ГТУ $\sigma_{вх}$	0,99
Коэффициент сохранения полного давления при выходе из ГТУ $\sigma_{вых}$	0,99
Коэффициент сохранения полного давления в камере сгорания $\sigma_{г}$	0,7
Механический КПД турбины $\eta_{м}$	0,99
Коэффициент полноты сгорания $\eta_{г}$	0,99
Электрическая мощность N_e , кВт	300
Низшая теплотворная способность синтез-газа Q_n^P , МДж/кг	8,5

Синтез-газ, полученный при газификации ТБО, в значительном количестве содержит примеси серы. Сера в синтез-газе содержится в основном в виде сероводорода (H_2S). Наличие сероводорода и его соединений приводит к коррозии металлических деталей, поэтому синтез-газ нуждается в очистке от серы [20].

Известны два основных способа очистки синтез-газа от серы: мокрый и сухой. Наиболее распространенным и простым из мокрых методов очистки синтез-газа от серы является содовый. Данный способ реализуется при пропускании синтез-газа в скруббере через раствор соды. При этом проходит обратимая реакция



При сухом способе очистки синтез-газ пропускают через твердую массу, которая способна поглощать H_2S . В качестве твердого поглотителя, как правило, используют активированный уголь. При мокрой очистке температура синтез-

газа после очистки значительно ниже, чем температура синтез-газа после сухой очистки. При анализе влияния способа очистки синтез-газа на электрический КПД ГТУ с измененной последовательностью примем температуру после мокрой очистки 333 К, а после сухой очистки — 800 К. На рис. 2 представлена зависимость электрического КПД ГТУ с измененной последовательностью процессов от степени повышения давления в компрессоре.

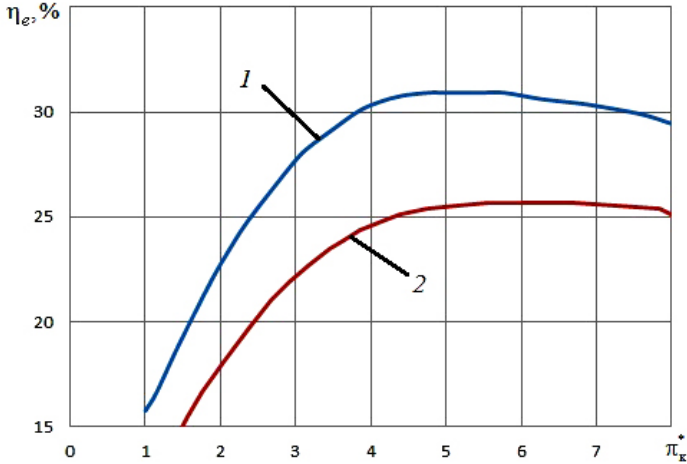


Рис. 2. Зависимость электрического КПД ГТУ от степени повышения давления в компрессоре при степени регенерации $\sigma = 0,85$, температуре на входе в турбину

$T_3 = 1173 \text{ K}$, температуре на входе в компрессор $T_6^* = 300 \text{ K}$:

1 — синтез-газ после сухой очистки ($T_1 = 800 \text{ K}$);

2 — синтез-газ после мокрой очистки ($T_1 = 333 \text{ K}$)

При математическом оптимуме степени повышения давления в компрессоре $\pi_k^* = 5,3$ электрический КПД при сухой очистке газа на 6 % выше, чем при мокрой очистке, и составляет $\eta_e = 31 \%$. Таким образом, наиболее целесообразно выбрать сухую очистку от серы, а очистку от твердых частиц проводить в циклоне. Зависимость КПД от степени повышения давления в компрессоре имеет пологий характер, что позволяет спроектировать высокоэффективные одноступенчатые радиальные турбину и компрессор [21–23]. Степень повышения давления ГТУ малой мощности целесообразно принять равной 4,5.

Зависимость удельного расхода топлива от степени повышения давления в компрессоре представлена на рис. 3, а зависимость расхода воздуха от степени повышения давления — на рис. 4.

При повышении давления в компрессоре $\pi_k^* = 4,5$ удельный расход топлива в ГТУ предложенной схемы мощностью $N_e = 300 \text{ кВт}$ составляет $C_e = 1,38 \text{ кг/кВт}$, расход воздуха $G_6 = 1,76 \text{ кг/с}$.

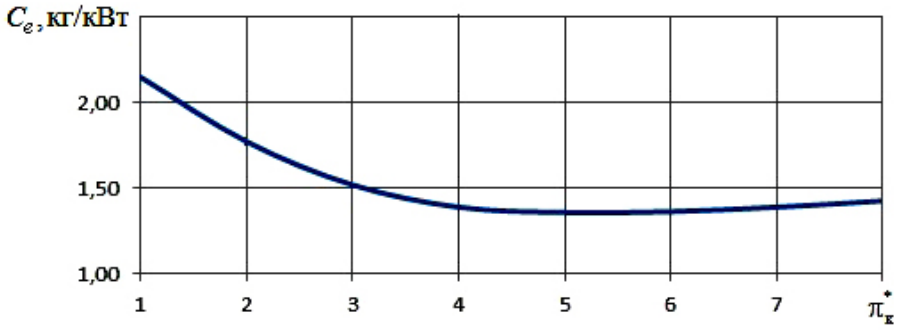


Рис. 3. Зависимость удельного расхода топлива в ГТУ от степени повышения давления в компрессоре при степени регенерации $\sigma = 0,85$, температуре продуктов сгорания на входе в компрессор $T_6^* = 300\text{ K}$, температуре на входе в турбину $T_3 = 1173\text{ K}$, температуре синтез-газа $T_1 = 800\text{ K}$

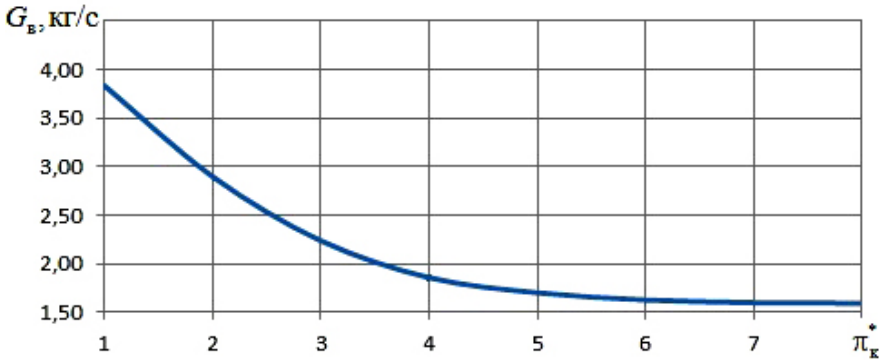


Рис. 4. Зависимость расхода воздуха в ГТУ от степени повышения давления в компрессоре при степени регенерации $\sigma = 0,85$, температуре продуктов сгорания на входе в компрессор $T_{вх.к}^* = 300\text{ K}$, температуре на входе в турбину $T_3 = 1173\text{ K}$, температуре синтез-газа $T_1 = 800\text{ K}$, электрической мощности $N_e = 300\text{ кВт}$

Таким образом, когенерационная ГТУ на продуктах газификации ТБО, работающая по схеме с измененной последовательностью процессов с электрической мощностью $N_e = 300\text{ кВт}$, имеет электрический КПД $\eta_e = 31\%$, удельный расход топлива $C_e = 1,38\text{ кг/кВт}$ и способна производить $Q = 0,51\text{ Гкал/ч}$ тепловой энергии.

Заключение. Проблема утилизации ТБО в Российской Федерации является актуальной, поскольку ТБО практически не подвергаются переработке, а складываются на полигонах, которые занимают значительные земельные площади. Эффективным методом утилизации ТБО является газификация с последующим использованием топливного газа в энергетических установках на базе газотурбинных двигателей.

Проведен анализ схем традиционной ГТУ малой мощности и ГТУ с измененной последовательностью процессов при работе на топливном газе низкого давления. Серийно выпускаемые ГТУ малой мощности работают по классической схеме, имеют регенератор, дожимной компрессор для повышения давления топлива перед камерой сгорания.

Газотурбинные установки с измененной очередностью процессов имеет значительные преимущества и является более технологичной, в отличие от традиционной ГТУ малой мощности. Технологичность достигается более низкой удельной стоимостью и лучшими массогабаритными характеристиками из-за отсутствия дожимного компрессора.

Использование сухой очистки синтез-газа по сравнению с мокрой очисткой при электрической мощности ГТУ $N_e = 300$ кВт, степени повышения давления $\pi_k^* = 4,5$, температуре в камере сгорания $T_3 = 1173$ К позволяет повысить электрический КПД ГТУ с измененной последовательностью процессов на 6 %.

Таким образом, применение когенерационных ГТУ с измененной последовательностью процессов позволит решить проблемы утилизации ТБО и улучшения экологической обстановки, поставляя при этом тепловую и электрическую энергию потребителю.

Литература

- [1] Rogoff M.J., Screve, F. Waste to energy technologies and project implementation. 2nd ed. UK, Noyes Publ., 2011.
- [2] Малышевский А.Ф. Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов жилого фонда в городах России [Электронный ресурс] // Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. URL: http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad_po_tbo.pdf (дата обращения 05.03.2017).
- [3] Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения 05.03.2017).
- [4] Общемировой объем выбросов метана и возможности его сокращения [Электронный ресурс] // Global Methane Initiative (GMI). URL: https://www.globalmethane.org/documents/analysis_fs_rus.pdf (дата обращения 05.03.2017).
- [5] Подлесная Т.А. Анализ эффективности и оптимизация параметров ГТУ с реактором-газификатором твердых бытовых, промышленных отходов и низкосортных твердых. Автореф. ... дис. канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 16 с.
- [6] Данилова С.К., Тумашев Р.З. Энерготехнологическая установка на базе газотурбинного двигателя с использованием продуктов газификации древесных отходов // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2016. № 4. С. 1–13 (in Russ.). DOI: 10.7463/aplts.0416.0846815.
- [7] Иванов В.Л. Газотурбинный энергопреобразователь для установки утилизации твердых бытовых и промышленных отходов методом газификации // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2012. Вып. 10. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-10-399 URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/energy/399.html>.

- [8] Анализ мирового опыта развития передовых технологий в теплоэнергетике // Модернизация электроэнергетики России на период до 2020 года [Электронный ресурс]. URL: http://nnhpe.spbstu.ru/wpcontent/uploads/2015/01/Analiz_mirovogo_opyta_razviti_tehnologiy.pdf (дата обращения 05.03.2017).
- [9] Micro turbine CHP. Applications for oil and gas industry // Capstone Turbine Corporation, 2008.
- [10] Kunte B. Thermodynamic, economic and emissions analysis of a micro gas turbine co-generation system operating on biofuels / Benjamin Kunte. Guaratinguetá, 2015.
- [11] Bohn D. Micro gas turbine and fuel cell – a hybrid energy conversion system with high potential. *Micro Gas Turbines*, 2005, pp. 13-1–13-46.
- [12] Do Nascimento M.A.R., de Oliveira R.L., dos Santos E.C., Gomes E.E.B., Dias F.L.G., Velásques E.I.G., Carrillo R.A.M. Micro gas turbine engine: A review. In progress in gas turbine performance. New York, USA. 2013.
- [13] Цанев С.В., Буров В.Д., Пустовалов П.А. К вопросу о карнотизации цикла Брайтона энергетических газотурбинных установок // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2010. № 6. С. 2–6.
- [14] Моляков В.Д., Тумашев Р.З. Обоснование схем и параметров высокоэффективных газотурбинных установок для малой энергетики // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2012. № 10. С. 52–58.
- [15] Гусаров В.А., Кулагин Я.В. Применение газотурбинных энергогенераторов в сельском хозяйстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2012. № 8. Т.3. С. 63–65.
- [16] Морозенко М.И., Черняев С.И., Попова Е.В., Морозенко Д.Н., Карева Е.О. Исследование характеристик генераторного газа при пароплазменной газификации ТБО // *Успехи современного естествознания*. 2016. № 5. С. 141–147.
- [17] Загрутдинов Р.Ш., Никишанин М.С., Сеначин П.К. Газификация твердых бытовых отходов // *Всероссийская конференция с международным участием «Горения топлива: теория, эксперимент, приложения»*. Новосибирск, 16–18 ноября 2015 г. Институт теплофизики СО РАН.
- [18] Тумашев Р.З., Бодров Н.Г. Когенерационная установка на попутных нефтяных газах с высоким содержанием тяжелых углеводородов // *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, вып. 10. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-10-401 URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/energy/401.html>.
- [19] Михальцев В.Е., Моляков В.Д. *Расчет параметров цикла при проектировании газотурбинных двигателей и комбинированных установок*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 58 с.
- [20] Моляк М.А., Чалова О.Б. *Коррозия металлов*. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2008. 100 с.
- [21] Тумашев Р.З., Щеголев Н.Л., Кулаков Д.М. Утилизация шахтного метана в газотурбинных установках для производства электрической энергии и теплоты // *Безопасность в техносфере*. 2015. Т. 4. №. 5. С. 41–48. DOI: 10.12737/16963.
- [22] Осипов М.И., Тумашев Р.З., Моляков В.Д. Усовершенствование ГТУ малой мощности при использовании топливных газов низкого давления // *Труды Междунар. науч.-практич. конф. «Малая энергетика-2004»*. Москва, 2004. С. 113–116.
- [23] Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. *Теория и расчет авиационных лопаточных машин*. М.: Машиностроение, 1986.

Сельницын Александр Сергеевич — магистрант кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Рамиль Зарифович Тумашев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

AN OVERVIEW OF CAPABILITIES FOR CLUSTER ANALYSIS OF DATA FOUND IN THE STATISTICA ADVANCED SOFTWARE PACKAGE

I.A. Tikhonov

selnitsynas@mail.ru
SPIN-код: 9927-4177

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article reviews data clustering capabilities of the STATISTICA software package. We describe the clustering methods found in this product and the specifics of working with them from a practical standpoint. We consider the concept of distance measure between elements of the initial set and certain methods of clustering the initial set of observations, as well as cluster analysis results produced by the algorithms implemented in the STATISTICA Advanced package. There is no doubt that cluster analysis of data is highly relevant and pertinent at present, since data and data analysis results play an increasingly significant role in the information society of today, and clustering provides a better understanding of these data.

Keywords

Data analysis, cluster analysis, clustering, unsupervised classification, STATISTICA, Euclidean space, hierarchical and non-hierarchical clustering methods, joining/tree clustering, k-mean clustering, two-way joining

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Hartigan J.A. Clustering algorithms. John Wiley & Sons, Inc., 1975. 369 p.
- [2] Duran B., Odell P. Cluster analysis. A survey. Springer-Verlag. Berlin – Heidelberg – N.Y. 1974.
- [3] Barsegyan, A.A., M.S. Kupriyanov, I.I. Kholod, M.D. Tess, S.I. Elizarov. Analiz dannykh i protsessov [Analysis of data and processes]. St. Petersburg, Peterburg Publ., 2009. 512 p.
- [4] Kalinina V.N., Solov'ev V.I. Vvedenie v mnogomernyy statisticheskiy analiz [Introduction to multivariate statistical analysis]. Moscow, GUU Publ., 2003. 66 p.
- [5] Ayzazyan A.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika: Klassifikatsii i snizhenie razmernosti [Applied statistics: Classification and reduction of dimensionality]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1989. 607 p.
- [6] Metody klasterного analiza. Ierarkhicheskie metody. Available at: <http://www.intuit.ru/studies/courses/6/6/lecture/182?page=2> (accessed 10.10.2017).
- [7] Obzor STATISTICA. Available at: <http://statsoft.ru/products/overview/#advantages> (accessed 25.09.2017).
- [8] Data clustering: A Review A.K. Jain Michigan State University M.N. Murty. *Indian Institute of Science AND P.J. FLYNN The Ohio State University. ACM Computing Surveys*. Vol. 31, no. 3, September 1999. Available at: http://users.eecs.northwestern.edu/~yingliu/datamining_papers/survey.pdf (accessed 26.09.2017).
- [9] Alex Smola and S.V.N. Vishwanathan. Introduction to machine learning. Cambridge University Press, 2008. 234 p.

- [10] Bureeva N.N. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz s ispol'zovaniem PPP "STATISTICA"*. Uchebno-metodicheskiy material po programme povysheniya kvalifikatsii "Primenenie programmnykh sredstv v nauchnykh issledovaniyakh i prepodavanii matematiki i mekhaniki". Nizhniy Novgorod, 2007. 112 p (in Russ.).

Tikhonov I.A. — Master's Degree student, Department of Information Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — M.V. Vinogradova, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Information Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.