

УДК 536.7

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Пискунов М.В.¹, Войтков И.С.¹, Высокоморная О.В.¹, Высокоморный В.С.¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина 30), e-mail: vyssokomornyy@yandex.ru

Проведен анализ отказов автономных источников энергоснабжения. Установлено, что основной причиной отказов мини ТЭС газотранспортной системы является предельно высокая температура на выходе из конденсатора энергоустановки. Разработана математическая модель процессов тепломассопереноса при движении паров рабочего вещества по цилиндрическому каналу конденсатора при интенсивном охлаждении поверхности канала. Проведено численное моделирование нестационарного тепломассопереноса в условиях конденсации рабочего вещества в конденсаторе. Установлено влияние температуры окружающей среды и значения выходной мощности мини-ТЭС на температуру рабочего вещества на выходе из конденсатора. Рассчитаны значения времени наработки на отказ типичных автономных источников энергоснабжения в климатических условиях Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Выделены направления возможного повышения показателей надежности мини-ТЭС, работающих на газопроводах.

Ключевые слова: энергоснабжение, энергоустановка, тепломассоперенос, газотранспортная система, математическое моделирование.

THE INDICATORS OF THE RELIABILITY STANDALONE POWER SUPPLY SOURCES

Piskunov M.V.¹, Voitkov I.S.¹, Vyssokomornaya O.V.¹, Vyssokomornyy V.S.¹

¹National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, av. Lenina, 30), e-mail: vyssokomornyy@yandex.ru

The analysis of the remote power supply failures is carried out. It is established that the maximally high outlet temperature from the capacitor of power unit is the basic reason for the failures of mini TPS of gas transport system. The mathematical model of the heat-mass transfer processes while moving the working substance vapor through a cylindrical channel of condenser under intensive cooling of channel surface is developed. Is carried out the numerical simulation of nonstationary heat-mass transfer in the conditions of working medium condensation in the condenser. The influence of the ambient temperature and power output value of mini- TES on the temperature of work substance at the output from the condenser is established. The values of the time to failure of typical remote power supplies of power supply under the climatic conditions of East Siberia and Far East of Russia are calculated. Are selected the directions of a possible increase in the indices of reliability mini- TES, which work on the gas pipelines.

Keywords: energy supply, energy unit, heat-mass transfer, gas transport system, mathematical simulation.

Энергоснабжение – важнейший аспект функционирования любого производства. Стабильная подача необходимой для реализации технологических процессов энергии определяет стабильность работы предприятий. Вопросы надёжности и эффективности энергоснабжения приобретают особое значение для предприятий, имеющих на своём балансе удалённые от централизованной энергосистемы объекты (например, газо- и нефтепроводы большой протяженности). Как правило, функционирование таких объектов сопровождается необходимостью размещения мелких линейных объектов, таких как устройства электрохимзащиты, крановые узлы, пункты телемеханики и др. Если газо- или нефтепроводы расположены на территориях, удалённых от централизованной

энергосистемы, единственно возможным способом организации энергоснабжения является применение автономных источников.

Для энергообеспечения газопроводов Российского Дальнего Востока применяются автономные источники энергии с замкнутым термодинамическим циклом мощностью до 4 кВт (рис. 1). Такие источники работают на природном газе и характеризуются значительной длительностью работы в автоматическом режиме и высоким значением термического КПД. Тем не менее, часто происходят отказы в работе этого оборудования, которые негативно сказываются на функционировании газотранспортной системы. При этом анализ статистических данных показал [2], что одной из основных причин нарушений работы энергоисточника являются предельно высокие значения температуры рабочего вещества на выходе из конденсатора.

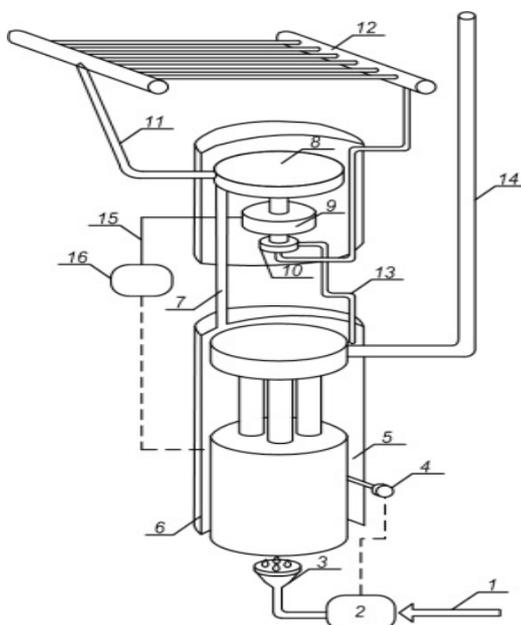


Рис. 1. Схема энергоустановки, работающей по замкнутому циклу пара: 1 – подвод топлива; 2 – панель управления подачей горючего; 3 – горелка; 4 – термостат; 5 – органическая жидкость; 6 – парогенератор; 7 – пар; 8 – турбина; 9 – генератор переменного тока; 10 – насос; 11 – подача пара в конденсатор; 12 – конденсатор; 13 – вывод конденсата; 14 – дымовая труба; 15 – кабели входа переменного тока к выпрямителю; 16 – электрический щит.

Цель исследования – анализ режимов работы автономных энергоустановок, при которых возникают отказы в связи с предельно высокой температурой в конденсаторе, а также определение наработки на отказ с учётом климатических условий Дальнего Востока России.

Постановка задачи

Энергоустановка (рис. 1) функционирует по следующему принципу. Горелка 3, работающая на природном газе, в парогенераторе 6 нагревает, а затем испаряет органическое рабочее вещество (дихлорбензол). Рабочее вещество в парообразном состоянии подаётся в турбину 8 и приводит во вращение вал турбогенератора переменного тока 9. Далее рабочее вещество поступает в конденсатор с воздушным охлаждением 12, состоящий из 2 рядов оребрённых трубок внутренним диаметром $D_{in}=38$ мм, объединённых коллекторами. Рабочее вещество конденсируется, насосом 10 возвращается в парогенератор 6, и цикл замыкается. Следует отметить, что дихлорбензол помимо использования в рабочем цикле энергоустановки является также жидкостью, смазывающей подшипники скольжения вала турбогенератора.

Предполагалось, что дихлорбензол в парообразном состоянии при температуре насыщения T_s поступает в трубки конденсатора (рис. 2). Через стенки трубок происходит теплоотвод от рабочего вещества окружающему воздуху, сопровождающийся охлаждением и конденсацией паров дихлорбензола. На внутренней поверхности трубок конденсатора образуется плёнка, толщина которой по мере течения парожидкостной смеси внутри канала увеличивается. Процесс конденсации завершается при достижении доли пара в парожидкостной смеси рабочего вещества нормативного значения, заявленного заводом-изготовителем [4].

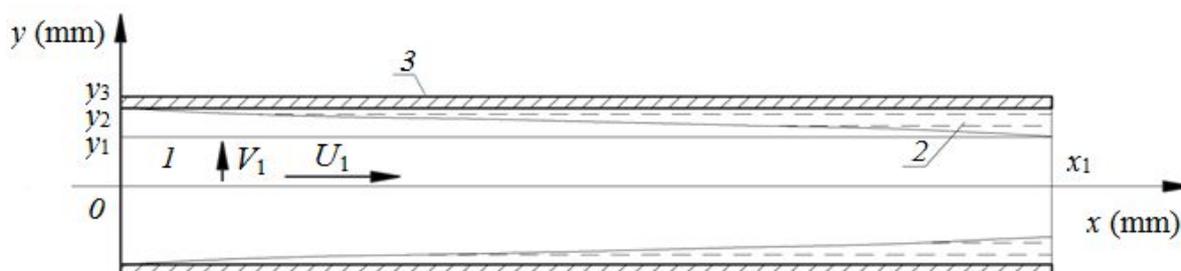


Рис. 2. Схема области решения задачи: 1 – пары рабочего вещества; 2 – конденсат; 3 – стенка трубки конденсатора; 4 – окружающий воздух.

Математическая модель

Нестационарные дифференциальные уравнения, описывающие процесс конденсации рабочего тела в трубках конденсаторной установки (рис. 2) и соответствующие сформулированной физической постановке задачи, имеют следующий вид.

Уравнение теплопроводности для рабочего вещества в зоне конденсации ($T_1=T_s$, $0 < x < x_1$, $0 < y < y_1$):

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} + U_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} + V_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right). \quad (1)$$

Уравнение теплопроводности для рабочего вещества вне зоны конденсации ($T_1 < T_s$, $0 < x < x_1$, $y_1 < y < y_2$):

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right). \quad (2)$$

Уравнение теплопроводности для стенки ($0 < x < x_1$, $y_2 < y < y_3$):

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = a_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right). \quad (3)$$

Уравнение диффузии паров рабочего вещества ($0 < x < x_1$, $0 < y < y_1$):

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} + U_1 \frac{\partial C_v}{\partial x} + V_1 \frac{\partial C_v}{\partial y} = D_1 \left(\frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} \right). \quad (4)$$

Уравнение движения паров рабочего вещества ($0 < x < x_1$, $0 < y < y_1$):

$$\rho_1 U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} + \rho_1 V_1 \frac{\partial U_1}{\partial y} = - \frac{\partial P_1}{\partial x} + \mu_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2}. \quad (5)$$

Уравнение неразрывности паров рабочего вещества ($0 < x < x_1$, $0 < y < y_1$):

$$\frac{\partial \rho_1 U_1}{\partial x} + \frac{\partial \rho_1 V_1}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

Уравнение состояния паров рабочего вещества ($0 < x < x_1$, $0 < y < y_1$):

$$P_1(x, y) = \frac{\rho_1(x, y)}{M_1} \cdot R_t \cdot T_1(x, y). \quad (7)$$

Здесь T – температура, К; t – время, с; x, y – координаты декартовой системы координат, м; U, V – компоненты скорости в проекции на оси x и y , м/с; a – коэффициент теплопроводности, м²/с; C_v – молярная концентрация, моль/м³; D – коэффициент диффузии, м²/с; ρ – плотность, кг/м³; P – давление, Н/м²; μ – коэффициент динамической вязкости, кг/(мс); M – молярная масса, кг/моль; R_t – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T_0 – начальная температура, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); Q_c – скрытая энергия фазового перехода, Дж/кг; W_c – скорость конденсации, кг/(м²·с); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_{out} – температура окружающей среды, К; T_{input} – температура паров на входе в канал, К; U_0, V_0 – начальные распределения скорости, м/с; C_0 – концентрация пара на входе в канал ($C_0 = \rho_{1input}/M_1$), моль/м³; ρ_{1input} – плотность пара на входе в канал, кг/м³; β – безразмерный коэффициент конденсации ($\beta = 0,1$); k_β – дополнительный коэффициент, равный 0,4; P^n – давление насыщенных паров, Н/м²; индексы «1», «2», «3» соответствуют парам дихлорбензола, его жидкой фазе и материалу труб конденсатора.

Система нестационарных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями (1)–(8) решалась методом конечных разностей [5, 6]. Разностные аналоги дифференциальных уравнений (1)–(8) решались локально–одномерным методом. Для решения одномерных разностных уравнений применялся метод прогонки с использованием неявной четырехточечной схемы. Для решения нелинейных уравнений применялся метод простых итераций. Методика оценки достоверности результатов выполненных численных исследований основана на проверке консервативности применяемой разностной схемы.

Результаты и обсуждение

Численные исследования выполнены при типичных значениях параметров работы рассматриваемых конденсаторных установок автономных источников энергоснабжения (рис. 2): начальная температура рабочего вещества на входе в конденсатор $T_1 = 403$ К; тепловой эффект конденсации дихлорбензола $Q_c = 311.7$ кДж/кг; размеры области решения $H_x = 400$ мм, $H_y = 1500$ мм; молекулярная масса дихлорбензола $M = 147$ кг/кмоль; безразмерный коэффициент испарения $\beta = 0.1$; скорость движения рабочего тела в конденсаторе $V_1 = 0.01$ м/с; коэффициент теплоотдачи при конденсации паров дихлорбензола в канале конденсатора $\alpha_{1-2} = 650$ Вт/(м²·К).

Теплофизические характеристики дихлорбензола, стали, воздуха приведены в [1, 7, 8].

На рис. 3 представлены зависимости температуры дихлорбензола на выходе из конденсатора T_{output} от входной температуры рабочего вещества T_{input} при разных значениях температуры окружающего воздуха. Необходимо отметить, что температура рабочего вещества на входе в конденсатор непосредственно связана с выходной электрической мощностью энергоустановки.

При этом критическим значением температуры дихлорбензола на выходе из конденсатора, при превышении которого риск возникновения отказа в работе автономного источника энергоснабжения значительно возрастает, является $T_{\text{output}} \approx 340$ К. На основании полученных результатов численного моделирования можно сделать вывод, что при температуре наружного воздуха $T_{\text{out}} = 303$ К критическое значение температуры рабочего вещества после конденсатора достигается уже при входной температуре $T_{\text{input}} \approx 420$ К, что соответствует мощности $P = 1500$ Вт (менее 40% от номинальной).

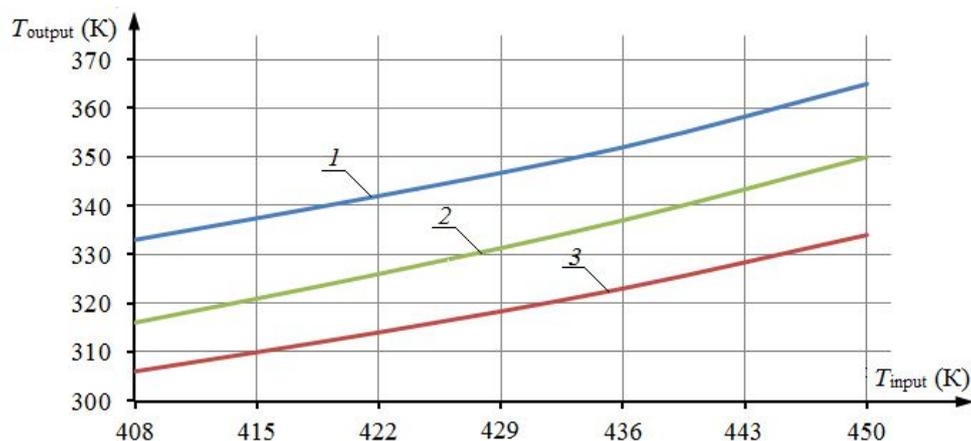


Рис. 3. Значения выходной температуры рабочего потока T_{output} при различных значениях температуры на входе в конденсатор T_{input} :
 1 – $T_{\text{out}} = 303$ К; 2 – $T_{\text{out}} = 273$ К; 3 – $T_{\text{out}} = 253$ К.

В результате проведённых численных исследований определена зависимость температуры рабочего тела на выходе из конденсатора от температуры окружающего конденсатор воздуха при различных режимах работы (таблица). Полученные зависимости хорошо соответствуют данным, представленным на рис. 3.

Таблица Зависимость температуры дихлорбензола на выходе из конденсатора от температуры окружающего воздуха.

T_{out} (К)	253	263	273	283	293	303	313
При температуре на входе в конденсатор $T_{\text{input}}=403$ К							
T_{output} (К)	306	309	313	317	323	330	337
При температуре на входе в конденсатор $T_{\text{input}}=426$ К							
T_{output} (К)	314	318	322	326	332	338	346
При температуре на входе в конденсатор $T_{\text{input}}=447$ К							
T_{output} (К)	334	338	344	348	354	362	369

Результаты численных исследований позволяют определить наработку на отказ рассматриваемых автономных источников энергоснабжения при эксплуатации в конкретных климатических условиях. В качестве примера можно рассмотреть Амурскую область России, протяжённость магистральных газопроводов по территории которой составляет более 1200 км. Данные, представленные на рис. 3 и в таблице позволяют сделать вывод о том, что при функционировании автономной энергоустановки на номинальной мощности ($P = 2000$ Вт, $T_{\text{input}}=426$ К) температура рабочего вещества на выходе из конденсатора превысит критическое значение при температуре наружного воздуха около 303 К. По данным

многолетних климатических наблюдений [3] в Амурской области продолжительность погодных условий с температурой воздуха 300 К и выше в течение года составляет 840 ч. Таким образом, время наработки на отказ при мощности $P = 2000$ Вт в климатических условиях Амурской области составит 7920 ч.

Следует отметить, что климатические условия региона, рассматриваемого в качестве примера для расчета времени наработки на отказ, характеризуются большой продолжительностью периодов с пониженной температурой воздуха. В случае использования рассматриваемых автономных энергоустановок в регионах центральной части России или в странах Европы с более теплым климатом и большей продолжительностью периодов времени с повышенной температурой воздуха показатели надежности работы автономного источника энергоснабжения могут быть значительно снижены.

Заключение

Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать возникновение отказов в работе автономного источника энергоснабжения с замкнутым термодинамическим циклом при работе в широком диапазоне выходной мощности и в различных климатических условиях. В результате проведенных численных исследований процесса конденсации рабочего вещества (дихлорбензола) в воздушном конденсаторе автономного источника энергоснабжения с замкнутым термодинамическим циклом получены зависимости выходной температуры рабочего вещества от его начальной температуры и от температуры окружающего воздуха.

Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» (Шифр Федеральной целевой программы 2.1321.2014).

Список литературы

1. Бабилов. Ю.М. Органические и кремнийорганические теплоносители / Ю.М. Бабилов, Д.С. Рассказов. – М.: Энергия. – 1975. – 272 с.
2. Высокоморная О.В., Высокоморный В.С., Стрижак П.А. Анализ причин аварийных технических происшествий на автономных источниках энергоснабжения удалённых объектов единой системы газоснабжения России // Энергетик. – 2013. –Т. 31. – № 8. – С. 031-036.
3. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология»: Стандартинформ. – Москва. – 1999.
4. Eps operation and maintenance manual (powered by CCVT) // This document contains information that is proprietary to ORMAT SYSTEMS LTD. – 2006. – part 2. – 600 p.

5. Glushkov D.O. , Kuznetsov G.V., Strizhak P. A. Solid Phase Ignition of a Composite Propellant by a Hot Particle under Free Convection Heat Sink into the environment // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2014. – Vol. 8. –№ 2. – P. 196–204.
6. Glushkov D.O., Strizhak P.A. Transient heat and mass transfer of liquid droplet ignition at the spreading over the heated substrate // Advanced Materials Research. – 2014. – Article ID 269321.
7. Liquid Materials Handbook, The Atomic Energy Commission, Department of the Navy, Washington DC. – 1952.
8. Vargaftik N. B., Tables of Thermophysical Properties of Liquids and Gases. – 2nd ed. – New York: Hemisphere Publishing. – 1975.

Рецензенты:

Литвак В.В., д.ф.-м.н., профессор каф. Атомных и тепловых электростанций НИ ТПУ, г. Томск;

Стрижак П.А., д.ф.-м.н., профессор каф. Автоматизации теплоэнергетических процессов НИ ТПУ, г. Томск.