

распыления жидкостей и соответствующего измельчения капель для интенсификации процессов теплообмена и испарения в различных практических приложениях (в частности, при использовании распыленной воды при пожаротушении).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-620.2012.8).

Список литературы:

1. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21. – № 5. – С. 74–78.
2. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование тепломассопереноса при движении «тандема» капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. – 2012. – Т. 4. – № 12. – С. 531–538.
3. Стрижак П.А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21. – № 8. – С. 26–31.
4. Волков Р.С., Высокоморная О.В., Стрижак П.А. Численное исследование условий взаимодействия диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 10. – С. 74–79.
5. Андреев Г.Г., Глушков Д.О., Панин В.Ф., Стрижак П.А. Тепломассоперенос при взаимодействии диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания // Бултеровские сообщения. – 2012. – Т. 31. – № 8. – С. 86–94.
6. Стрижак П.А. Численный анализ процесса испарения капли, движущейся в струе воды через высокоскоростные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21. – № 9. – С. 17–23.

УДК 620.98

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ
РАБОТЫ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГО-
СНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ
ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ РОССИИ**

Высокоморный В.С., Высокоморная О.В., к.ф.-м.н., Стрижак П.А., д.ф.-м.н.
Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: VysokomornyyVS@yandex.ru

Функционирование газотранспортной системы связано со значительными затратами энергоресурсов. Как правило, на балансе газотранспортных предприятий есть удалённые от централизованной энергосистемы объекты. Как правило, единственно возможным способом подачи энергии на такие объекты является применение автономных источников энергоснабжения [1–3].

Представляет интерес комплексный анализ вопросов повышения надежности работы автономных источников энергоснабжения удаленных линейных объектов Единой системы газоснабжения России. В рамках выполнения данной задачи необходимо провести анализ типичных аварийных технических происшествий, возникающих при эксплуатации автономных энергоустановок, проанализировать интегральные характеристики показателей надежности работы энергоустановок на основе статистического исследования, разработать математические модели, позволяющие исследовать первопричины возникновения технических происшествий.

В настоящее время для энергоснабжения удаленных линейных объектов магистральных газопроводов, как правило, энергоустановки, работающие по замкнутому циклу пара (органическому циклу Ренкина). Несмотря на многоуровневые защиты, при эксплуатации этих энергоустановок ежегодно фиксируются десятки технических происшествий, приводящих к их нерегламентированным остановам.

Статистический анализ аварийных технических происшествий, проведенный на основе работы 101 энергоустановки, эксплуатируемой на магистральных газопроводах Дальнего Востока, позволяет выделить несколько причин наиболее типичных аварийных технических происшествий: обрыв пламени горелочного устройства (21 %), механическая неисправность турбоагрегата (25 %) и предельно высокая температура в конденсаторе (20 %).

Выявленные аварийные технические происшествия можно разделить на две группы: 1) технические происшествия, последствия которых устраняются в условиях эксплуатации (обрыв пламени горелочного и предельно высокая температуры в конденсаторе) – основным показателем надежности является параметр потока отказов $\omega(t)$; 2) аварийные технические происшествия, вследствие которых отказавшее оборудование не восстанавливается (механическая неисправность турбоагрегата) – основной показатель надёжности – интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Рассчитанные значения $\omega(t)$ для автономных энергоустановок соответствуют допустимым возможным диапазонам, значения же $\lambda(t)$ существенно превышают значения $\lambda(t)$ для типичных транзисторов и несколько меньше $\lambda(t)$ для паротурбинных установок. Это хорошо соответствует основным положениям современной теории надежности и иллюстрирует высокие значения $\lambda(t)$ для рассматриваемых энергоустановок, исходя из анализа их конструкции, составных элементов и принципов действия.

Результаты расчёта времени наработки на отказ T_0 рассматриваемых энергоустановок с учетом типичных технических происшествий

показали снижение этого показателя относительно данных, заявленных заводом-изготовителем (до 13,5 %).

Также выполнен расчет, установленных при проведении статистического анализа. Полученные отклонения являются, скорее всего, следствием неприспособленности энергоустановок к местным климатическим условиям и меняющимся характеристикам топлива.

Автономные энергоустановки эксплуатируются в сложных климатических условиях и одной из основных типичных технических происшествий является предельно высокая температура в конденсаторе. В рамках настоящей работы сформулированы физическая и математическая модели, позволяющие определить первопричины появления данного технического происшествия.

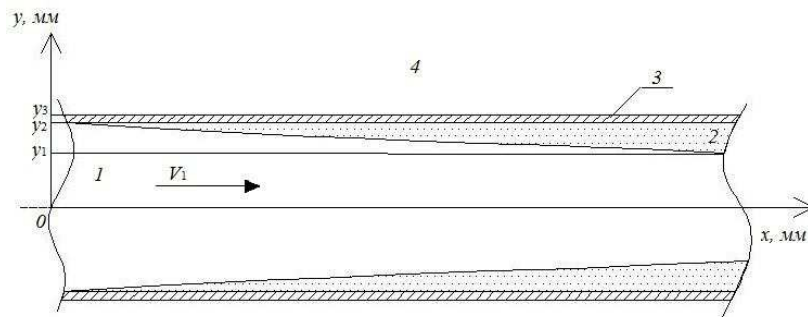


Рис. 1. Физическая постановка задачи исследования процесса конденсации

Математическая модель включала в себя систему нестационарных дифференциальных уравнений: 1) уравнение теплопроводности для рабочего вещества в зоне конденсации ($T_1 = T_s$, $0 < x < x_1$, $0 < y < y_1$):

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right) + \frac{W_c \cdot Q_c}{c_1 \cdot \rho_1};$$

2) уравнение теплопроводности для рабочего вещества вне зоны конденсации ($T_1 < T_s$, $0 < x < x_1$,

$$0 < y < y_1): \frac{\partial T_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right);$$

3) уравнение теплопроводности для стенки ($0 < x < x_1$, $y_2 < y < y_3$): $\frac{\partial T_3}{\partial t} = a_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right);$ 4) уравнение

движения потока рабочего вещества ($T_1 < T_s$, $0 < x < x_1$, $0 < y < y_1$):

$$\frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} = - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial P_1}{\partial x}.$$

Начальные условия: $t = 0$; $T_1 = T_0$, $\varphi_v = 1$. Граничные условия: 1) на границе «парожидкостная смесь – плёнка конденсата» $0 < x < x_1$, $y = y_1$:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\partial T_2}{\partial x}, \quad T_1 = T_2;$$

2) на границе «плёнка конденсата – внутренняя по-

верхность трубы» $0 < x < x_1, \quad y = y_2: \quad \alpha(T_2 - T_3) = \lambda_3 \left(\frac{\partial T_3}{\partial y} \right),$

$\alpha = 0,638 \left[\frac{\lambda_2^3 \rho_2 (\rho_2 - \rho_1) g Q_c}{\eta_2 D_{in} (T_s - T_3)} \right];$ 3) на границе «наружная поверхность трубы – воздух» $0 < x < x_1, y = y_3: T_3 = T_4;$ 4) на оси симметрии трубопровода $0 < x < x_1, y = 0: \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = 0.$

На базе разработанной математической модели проведена численная оценка влияния на выходную температуру из конденсаторной установки температуры рабочего тела на входе в конденсатор, коэффициента теплопроводности плёнки конденсата рабочего тела и скорости течения рабочего тела внутри трубок конденсаторной установки.

В результате выполненного статистического анализа определены типичные аварийные технические происшествия, возникающие при работе автономных энергоустановок, эксплуатируемых на удаленных линейных объектах магистральных газопроводов Восточной Сибири и Дальнего Востока. Определены основные причины данных технических происшествий. Вычислены значения основных интегральных характеристик надежности и безаварийности работы рассматриваемых автономных источников энергоснабжения (интенсивность отказов $\lambda(t)$, поток отказов $\omega(t)$ и наработка на отказ T_0). Показано, что значения основных характеристик надежности выходят за пределы допустимых.

На основе результатов численного исследования сформулированы выводы о незначительном влиянии на процесс конденсации нагрузки, при которой функционирует энергоустановка, и коэффициента теплопроводности плёнки конденсата. Найдено предельное значение скорости движения теплоносителя внутри трубок, при котором обеспечивается полное завершение процесса конденсации полученных результатов сформулированы рекомендации, направленные на повышение надежности работы автономных энергоустановок, предназначенных для энергоснабжения удаленных линейных объектов магистральных газопроводов России.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 2.80.2012).

Список литературы:

1. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года. – Утверждена распоряжением Правительства РФ от 28 августа 2003 г. № 1234.
2. Ливинский А.П., Редько И.Я., Филин В.М. Пути решения проблем автономного энергоснабжения потребителей удалённых регионов России // Энергетик. – 2010. – № 4. – С. 22–26.
3. ГОСТ 27-002-2009. Надежность в технике. Термины и определения. – М., 2011. – 28 с.