

СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Г.Г. Куликов, Б.Р. Кулбаев

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

Проблема пожарной защиты летательного аппарата, где наиболее энергонапряженным объектом является силовая установка, существует давно и продолжает быть актуальной и в настоящее время ввиду катастрофических последствий возникновения пожара на борту. В статье рассматриваются основные элементы системы пожарной защиты силовой установки в составе летательного аппарата. Описываются структурно-логическая модель работы блока пожарной защиты и принцип работы сигнализатора пожара пневматического типа, которые являются ключевыми элементами системы обеспечения безопасности эксплуатации летательного аппарата.

Предлагается проводить системное моделирование процесса перехода силовой установки из нормального состояния в критическое состояние – пожар – на основе анализа законов сохранения и перехода различных видов энергии при пожаре. Отмечается, что разработаны и находят широкое применение методы и модели процессов горения различных материалов, реализованных в виде пакетов прикладных программ. Однако необходимым условием применения указанных пакетов является формализация предметной постановки задачи и задание ее исходных условий. Приводится методика построения структуры нестационарной модели пожара в отсеке силовой установки.

Представлен эффективный инструмент при проведении испытаний системы пожарной защиты – комплексный стенд контроля и диагностики, который позволяет моделировать в квазистатическом режиме как процессы нормального функционирования системы, так и отказные ситуации. Приводятся результаты анализа процессов, полученных при испытаниях системы пожарной защиты силовой установки на комплексном полунатурном стенде.

Среди преимуществ применения полунатурного стенда авторы выделяют значительное сокращение объема и стоимости натурных испытаний вновь разрабатываемых систем. Результаты работы могут быть использованы для разработки бортовой динамической модели распространения пожара в отсеке силовой установки для перспективной интеллектуальной системы пожаротушения.

Ключевые слова: система пожарной защиты, пожар силовой установки, сигнализатор пожара, методология IDEF0, модель пожара, стенд контроля и диагностики.

Введение

Система пожарной защиты летательного аппарата является одной из наиболее ответственных в части обеспечения безопасности полета, так как возникновение пожара на летательном аппарате представляет исключительную опасность и при непринятии мер может иметь катастрофические последствия. Анализ статистических данных показывает, что, несмотря на относительно небольшое количество катастроф, вызванных огнем, пожар занимает пятое место среди причин гибели пассажиров и экипажа [1]. Таким образом, задача своевременного обнаружения пожара и его ликвидация является актуальной.

Стационарная система пожарной защиты летательного аппарата предназначена для обнаружения и ликвидации пожара в наиболее пожароопасных местах. В зависимости от типа летательного аппарата и его назначения пожароопасными местами являются: мотогондолы маршевых и вспомогательных двигателей, сами двигатели, места расположения топливных баков, багажно-грузовые отсеки и другие зоны [2, 3]. На многодвигательных самолетах комплекс пожаротушения может состоять из двух и более автоматических систем пожарной сигнализации с общим пультом управления.

Применение методов моделирования к проблеме выявления опасного состояния силовой установки, такого как пожар, позволит на уровне изменений параметров исследовать характеристики надежности, живучести, отказоустойчивости системы.

1. Рассмотрение принципов работы системы пожарной защиты

В состав системы пожарной защиты двухдвигательного самолета входит блок пожарной защиты, пульт управления, сигнализаторы пожара силовых установок, огнетушители (ОТ1–ОТ5), трубопроводы подачи огнетушащего средства (рис. 1). Пульт управления СПЗ, расположенный в кабине пилотов, служит для индикации состояния защищаемых отсеков и включения пожаротушения.

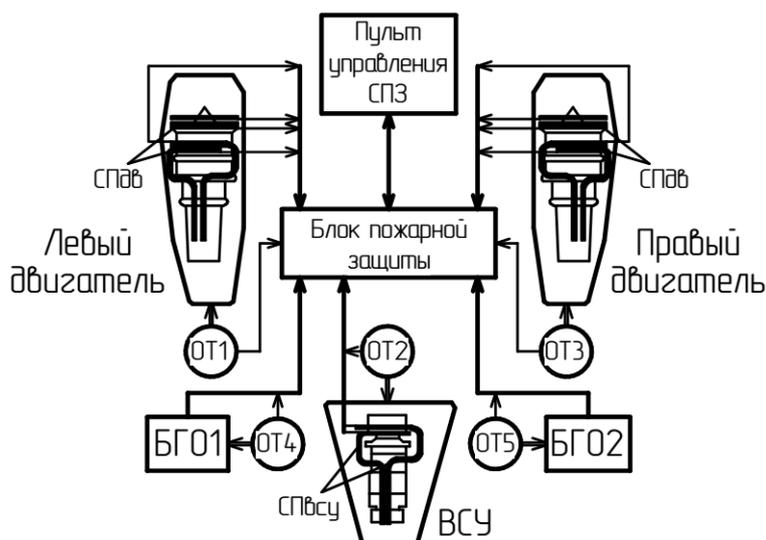


Рис. 1. Состав системы пожарной защиты двухдвигательного самолета

Сигнализаторы пожара (наиболее распространенными в настоящее время становятся сигнализаторы пожара-перегрева) представляют собой устройства, преобразующие физико-химические факторы пожара в изменение электрических параметров для дальнейшей обработки и выдачи сигнала о пожаре. Наиболее распространенными сигнализаторами пожара являются линейные

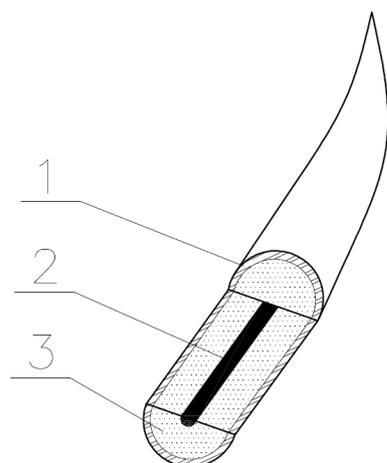


Рис. 2. Линейный сигнализатор пневматического типа

сигнализаторы пневматического типа, работа которых основана на повышении давления газа с повышением его температуры. Конструктивно сигнализатор представляет собой центральный проводник 2 из водорода, окруженный газообразным гелием 3 и помещенный в металлический корпус 1, и наматывается на корпус силовой установки (рис. 2) [4]. Газообразный гелий увеличивает свое давление при увеличении температуры вокруг корпуса датчика в соответствии с уравнением газового состояния за счет выделения газа из центрального проводника, и выдается сигнал тревоги. При этом выделяющийся газ отличается от гелия, с ним не смешивается, химически не взаимодействует и поглощается проводником, как только нагретый участок датчика охлаждается ниже критической температуры. Поскольку процесс выделения и поглощения газа из проводника обратим, датчик может быть использован многократно.

Блок пожарной защиты, являясь важнейшим элементом наряду с сигнализатором пожара, предназначен для обработки информации от систем обнаружения и ликвидации пожара, формирования аварийных и предупреждающих сигналов на пульте управления, проверки исправности компонентов систем.

Структурно-логическая модель работы блока пожарной защиты, разработанная с помощью методологии IDEF0, представлена на рис. 3. Для блока входной информацией являются темпе-

ратура силовых установок, сигналы о состоянии багажно-грузовых отделений (БГО), сигналы подсистемы пожаротушения. Выходной информацией, которую получает пульт управления, являются состояние силовых установок, состояние БГО, срабатывание подсистемы пожаротушения.

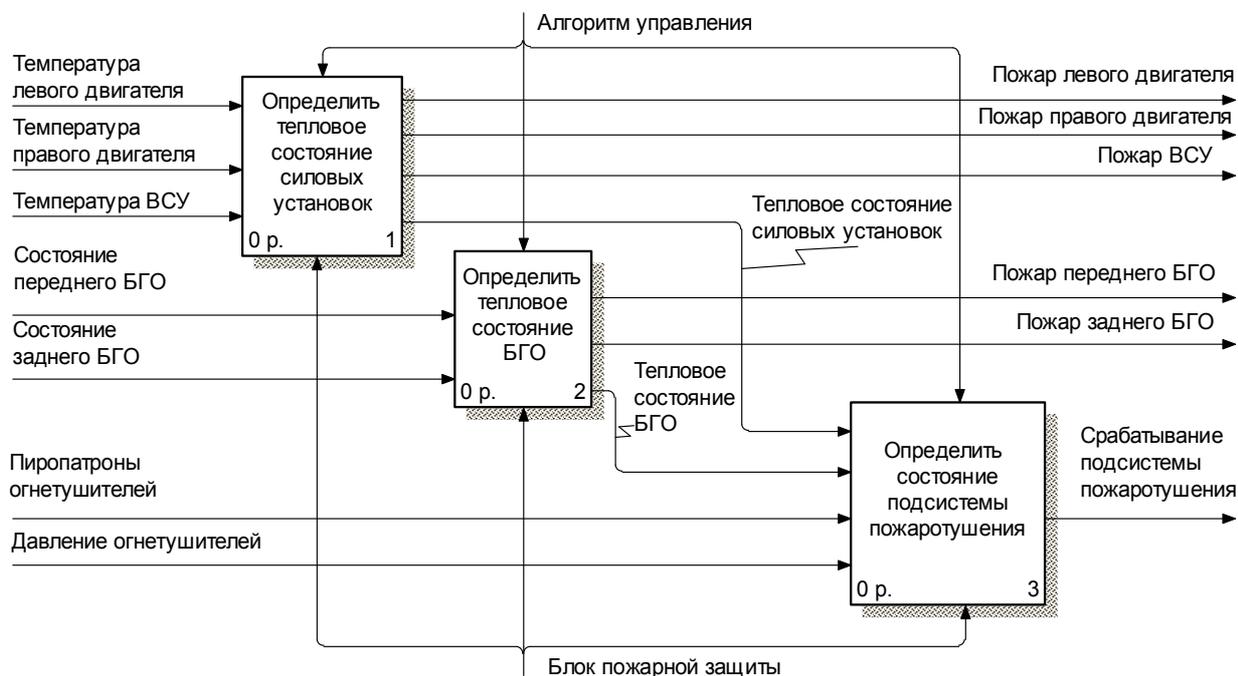


Рис. 3. Структурно-логическая модель работы блока пожарной защиты

2. Модель пожара в отсеке силовой установки

Аварии двигателей вследствие причин нелокализованного разрушения ротора, как правило, практически всегда сопровождаются пожаром в двигательном отсеке. Под нелокализованным разрушением ротора понимается любое разрушение, приводящее к выбросу из двигателя обломков ротора, которые могут привести к опасным последствиям для самолета [5].

При этом на каждом двигателе имеются топливная, масляная, гидравлическая системы, имеющие большую протяженность и многочисленные механические соединения. При разрушении трубопроводов этих систем возможно появление течи топлива, масла. При контакте авиационных жидкостей с поверхностями, имеющими высокие температуры, или в результате искрения разрядов статического электричества в отсеке силовой установки может возникнуть пожар. Например, большинство применяемого авиационного топлива имеет температуру горения порядка 220 °С, когда поверхность силовой установки в зоне расположения камер сгорания имеет температуру в области 350–500 °С.

Таким образом, можно выделить следующие прецеденты, приводящие к пожару в отсеке силовой установки:

- нарушение герметичности топливных, масляных трубопроводов;
- контакты авиационных жидкостей с нагретыми поверхностями;
- нелокализованное разрушение ротора;
- искрение проводов, как следствие – пожар электропроводки.

На основании данных причин сигнализаторы пожара в большинстве случаев размещают на силовой установке в следующих зонах:

- вентилятора;
- маслобака и коробки приводов;
- камеры сгорания.

Анализ прецедентов показывает, что во время пожара силовой установки могут выделяться следующие виды энергий.

Краткие сообщения

1. Энергия горения топлива W_1 на максимальной производительности топливного насоса:

$$W_1 = f_1(G_T, N_C, V, P_{ВХ}), \quad (1)$$

где G_T – производительность топливного насоса; N_C – полнота сгорания топлива; V – скорость обдуваемого воздуха; $P_{ВХ}$ – давление воздуха на входе двигателя.

Энергия горения топлива W_1 в силовой установке будет определяться газодинамическими параметрами обдуваемого воздуха, производительностью топливного насоса и полнотой сгорания топлива.

2. Электромеханические запасы энергии W_2 :

$$W_2 = f_2(Q), \quad (2)$$

где Q – переменная, определяющая механическую мощность.

При нелокализованном разрушении ротора по закону сохранения энергии механическая мощность неисправных агрегатов может преобразоваться в тепловую мощность, которая приведет к возникновению пожара. К примеру инцидент, произошедший 22 августа 2018 г. с самолетом Ту-204, выполнявшим рейс по маршруту Уфа – Сочи, привел к возникновению титанового пожара по причине разрушения лопаток компрессора, которые попали в зазор между ротором и статором силовой установки [6].

3. Энергия распределенного горения W_3 , зависящая частично от энергии горения топлива W_1 , частично от электромеханической мощности W_2 .

$$W_3 = f_3(W_1, W_2). \quad (3)$$

Указанные виды энергий при пожаре силовой установки можно оценить с помощью прикладных пакетов программ, которые являются универсальным инструментом моделирования физических процессов при пожаре [7, 8].

На рис. 4 показана модель распространения пожара в отсеке силовой установки. Возникновение пожара происходит из-за разрыва топливного трубопровода, через который проходит расход 0,05 кг/с керосина, объем подкапотного свободного пространства составляет 1,94 м³.

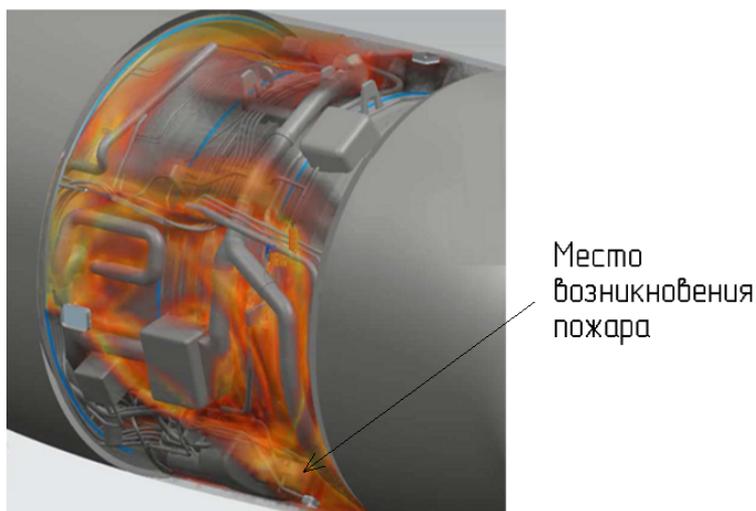


Рис. 4. Модель распространения пожара в отсеке силовой установки

3. Проверка функционирования системы

В настоящее время широко используются стенды, позволяющие на уровне изменений параметров исследовать указанные характеристики надежности и живучести системы [9]. Проверка функционирования системы проходит по схеме стенда, изображенного на рис. 5.

В состав стенда входит исследуемая система пожарной защиты и комплексный пульт контроля и диагностики. Комплексный пульт включает в себя элементы индикации, имитаторы исполнительных механизмов тушения, имитаторы теплового состояния силовых установок. Имитаторы исполнительных механизмов тушения используются для подмены пиропатронов огнетушителей, которые срабатывают по сигналам системы пожарной защиты, при этом огнетушащее средство, хранящееся под высоким давлением в баллоне, поступает по трубопроводам в отсек

силовой установки. Имитаторы теплового состояния силовых установок характеризуют состояние объекта в соответствии с моделированием необходимой ситуации как в штатных режимах работы, так и при различных отказах объекта.

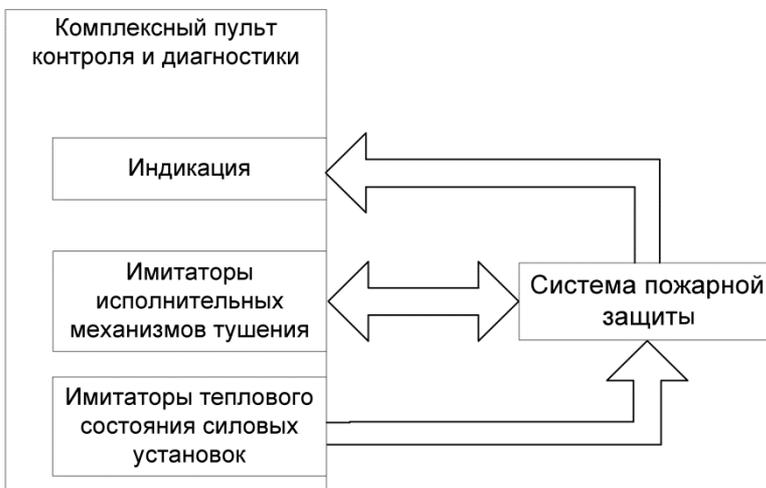


Рис. 5. Схема стенда для проведения испытаний



Рис. 6. Комплексный пульт контроля и диагностики

Для проведения испытаний системы пожарной защиты был разработан комплексный пульт (рис. 6). Данный комплексный пульт позволяет проводить проверку при следующих состояниях:

Краткие сообщения

- штатное функционирование системы;
- отказные ситуации (имитация отказов реализует обрывы и короткие замыкания внешних электрических цепей);
- реконфигурация проверяемой системы в случаях отказов и повторного пожара.

С использованием данного комплексного пульта были получены результаты проверок при штатном функционировании системы пожаротушения силовой установки (рис. 7). Объем подкапотного свободного пространства составляет $1,94 \text{ м}^3$, огнетушащее средство – хладон, сигнализаторы пожара – линейный сигнализатор пневматического типа. Срабатывание сигнализаторов составляет не более 8 с, достижение пожаротушащей концентрации – 16,2 с.

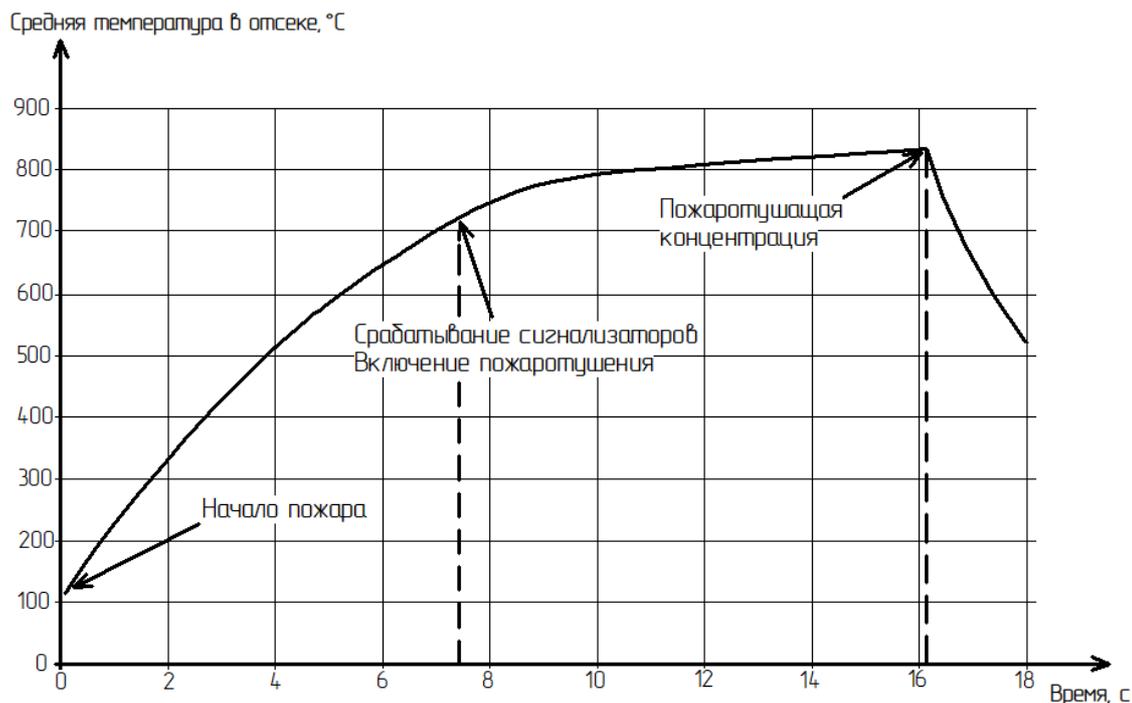


Рис. 7. График работы системы пожаротушения силовой установки

Выводы

Разработан технический стенд, включающий в себя исследуемую систему пожаротушения и комплексный пульт контроля и диагностики. Совместные испытания системы пожарной защиты с комплексным пультом позволяют на уровне изменений параметров исследовать технические характеристики системы в широком диапазоне, также позволяют значительно сократить стоимость и объем натурных испытаний вновь разрабатываемых систем.

Литература

1. Кулбаев, Б.Р. Структурно-функциональная модель системы пожарной защиты силовой установки летательного аппарата / Б.Р. Кулбаев, Г.Г. Куликов // Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации – 2017: X научно-практическая конференция студентов и аспирантов. Иркутск, 5–7 дек. 2017: тр. конф. – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА. – 2017. – Т. 1. – С. 180–184.
2. Мецержакова, Т.П. Проектирование систем защиты самолетов и вертолетов: учеб. пособие / Т.П. Мецержакова. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
3. Кулбаев, Б.Р. Системная модель пожарной защиты силовой установки летательного аппарата и ее испытания / Б.Р. Кулбаев, Г.Г. Куликов // Молодежный Вестник УГАТУ. – 2018. – № 2 (19). – С. 73–76.
4. Hillman, Thomas C. Aircraft Fire Detection and Suppression / Thomas C. Hillman, Steven W. Hill, Martin J. Sturla. – Kidde Aerospace & Defense. Technical Paper, Kidde plc, USA, 2002. – 30 p.

5. Рекомендательный циркуляр № РЦ-АП25-903(d)(1)/АП23-903(b)(1). Конструктивные меры по минимизации опасности, вызываемой нелокализованным разрушением ротора газотурбинного маршевого двигателя и вспомогательного двигателя. АР МАК. 1999.

6. <http://www.bashinform.ru/news/1201329-v-samolete-tu-204-ufa-sochi-proizoshel-titanovyy-rozhar-rosaviatsiya/> (дата обращения: 14.03.2019).

7. Малышев, К.С. Математическое моделирование типовых очагов горения в начальной стадии при помощи программы FDS (Fire Dynamics Simulator) / К.С. Малышев // Молодой ученый. – 2011. – Т. 1, № 10. – С. 54–57.

8. Численное моделирование пожара в вагоне метрополитена / А.И. Данилов, В.А. Маслак, А.В. Вагин, И.А. Сиваков // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2017. – Т. 26, № 10. – С. 27–35.

9. Методология полунатурного комплексного функционального моделирования ГТД и его систем / Г.Г. Куликов, В.Ю. Арьков, В.С. Фатиков, Г.И. Погорелов // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 13, № 2 (35). – С. 88–95.

Куликов Геннадий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; gennadyg_98@yahoo.com.

Кулбаев Булат Русланович, аспирант, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; bulat-kulbaev@rambler.ru.

Поступила в редакцию 25 февраля 2019 г.

DOI: 10.14529/ctcr190213

SYSTEM MODEL OF MONITORING AND DIAGNOSTICS FIRE PROTECTION OF AIRCRAFT POWERPLANT

G.G. Kulikov, gennadyg_98@yahoo.com,

B.R. Kulbaev, bulat-kulbaev@rambler.ru

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

The problem of fire protection of aircraft, where the power plant is the most energy-intensive object, has existed for a long time and continues to be relevant in the present day due to the disastrous consequences of a fire on board. The article discusses the main elements of the fire protection system of the power plant as part of the aircraft. It describes the structural and logical model of the fire protection unit and the principle of operation of the pneumatic type fire detector, which are key elements of the safety system of the aircraft.

It is proposed to carry out system modeling of the process of transition of a power plant from a normal state to a critical state – a fire, based on an analysis of the laws of conservation and transition of various types of energy during a fire. It is noted that the methods and models of the combustion processes of various materials, implemented in the form of application software packages, have been developed and are widely used. However, a necessary condition for the application of these packages is the formalization of the objective formulation of the problem and the setting of its initial conditions. A method for constructing the structure of a non-stationary model of a fire in a power plant compartment is given.

An effective tool for testing the fire protection system is presented – a comprehensive monitoring and diagnostics bench, which allows simulating both processes of normal system operation and failure situations in a quasistatic mode. The results of the analysis of the processes obtained during testing of the fire protection system of a power plant on a complex semi-natural stand are presented.

Among the advantages of using a semi-natural stand, the authors distinguish a significant reduction in the volume and cost of field tests of newly developed systems. The results of the work can be

used to develop an on-board dynamic model of the spread of fire in the power plant compartment for a promising intelligent fire extinguishing system.

Keywords: fire protection system, power plant fire, fire detector, IDEF0 methodology, fire model, monitoring and diagnostics stand.

References

1. Kulbaev B.R., Kulikov G.G. [Structurally Functional Model of Fire Protection System of an Engine Installation of the Aircraft]. *Aktual'nye problemy razvitiya aviatsionnoy tekhniki i metodov ee ekspluatatsii – 2017: X nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov i aspirantov. Irkutsk, 5–7 dek. 2017* [Current Problems of Development of the Aircraft Equipment and Methods of its Operation – 2017: X Scientific and Practical Conference of Students and Graduate Students. Irkutsk, 5–7 Dec. 2017]. Irkutsk, 2017, vol. 1, pp. 180–184. (in Russ.)
2. Meshcheryakova T.P. *Proektirovanie sistem zashchity samoletov i vertoletov. Uchebnoe posobie*. [Projection of Systems of Protection of Planes and Helicopters. Manual]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 232 p.
3. Kulbayev B.R., Kulikov G.G. [Systemic Model of Fire Protection of an Engine Installation of the Aircraft and its Test]. *Youth Bulletin of USATU*, 2018, no. 2 (19), pp. 73–76. (in Russ.)
4. Hillman Thomas C., Hill Steven W., Sturla Martin J. *Aircraft Fire Detection and Suppression*. Kiddle Aerospace & Defense. Technical Paper, Kidde plc, USA, 2002. 30 p.
5. *Rekomendatel'nyy tsirkulyar № RTS-AP25-903(d)(1)/AP23-903(b)(1). Konstruktivnye mery po minimizatsii opasnosti, vyzvaemoy nelokalizovannym razrusheniem rotora gazoturbinnogo marshevogo dvigatelya i vspomogatel'nogo dvigatelya. AR MAK* [Recommendatory Circular No. RTs-AP25-903(D)(1)/AP23-903(B)(1). Constructive Measures for Minimization of the Danger Caused by the Non-local Destruction of a Rotor of the Gas-Turbine Mid-Flight Engine and Auxiliary Engine]. 1999.
6. Available at: <http://www.bashinform.ru/news/1201329-v-samolete-tu-204-ufa-sochi-proizoshel-titanovyy-pozhar-rosaviatsiya/> (accessed 14.02.2019).
7. Malyshev K.S. [Mathematical Model Operation of the Standard Centers of Combustion in an Incipient State by Means of the FDS Program (Fire Dynamics Simulator)]. *Young Scientist*, 2011, vol. 1, no. 10, pp. 54–57. (in Russ.)
8. Danilov A.I., Maslak V. A., Vagin A.V., Sivakov I.A. [Numerical Model Operation of the Fire in the Car of the Subway]. *Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 27–35. (in Russ.)
9. Kulikov G.G., Ar'kov V.Yu., Fatikov V.S., Pogorelov G.I. [Methodology of Semi-Natural Complex Functional Model Operation of GTE and its Systems]. *Bulletin of USATU*, 2009, vol. 13, no. 2 (35), pp. 88–95. (in Russ.)

Received 25 February 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Куликов, Г.Г. Системная модель контроля и диагностики пожарной защиты силовой установки летательного аппарата / Г.Г. Куликов, Б.Р. Кулбаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 145–152. DOI: 10.14529/ctcr190213

FOR CITATION

Kulikov G.G., Kulbaev B.R. System Model of Monitoring and Diagnostics Fire Protection of Aircraft Powerplant. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 145–152. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190213