

Научная статья
УДК 629.7.067.8, 51-74, 519.16
DOI: 10.34759/vst-2023-1-98-106

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ПОЖАРОТУШЕНИЯ САМОЛЕТА

Артем Геннадьевич Агеев¹✉, Анастасия Павловна Галанова²

^{1,2} ПАО «Туполев»,
Москва, Россия

¹ snaker-tema@mail.ru ✉

² naiagalanova@gmail.com

Аннотация. Исследуются подходы к выбору очередей пожаротушения с точки зрения создания наиболее эффективных условий для тушения пожара в каждом пожароопасном отсеке летательного аппарата.

Установлено, что на большинстве современных самолетов используются централизованные системы пожаротушения баллонного типа, при этом огнетушители изначально разделены на последовательно срабатывающие очереди пожаротушения в составе нескольких баллонов независимо от того, в каком отсеке произошло возгорание.

Численным методом проведен расчет гидравлических потерь и найдены создаваемые средние давления на выходах из отверстий распылительных коллекторов в пожароопасных отсеках самолета.

Разработан принципиально новый, комбинаторный подход к выбору очередей пожаротушения, позволяющий повысить эффективность системы пожарной защиты при возникновении пожара в отсеках самолета и отвечающий последним тенденциям развития цифровых систем противопожарной автоматики.

В рамках комбинаторного подхода разработан алгоритм формирования очередей пожаротушения, имеющий адаптивный характер, при котором комбинация огнетушителей может меняться с учетом возможных утечек в баллонах, что повышает отказобезопасность и надежность системы.

Ключевые слова: система пожаротушения самолета, огнетушитель, пожароопасный отсек, гидравлические потери, комбинаторный анализ, очередь пожаротушения

Для цитирования: Агеев А.Г., Галанова А.П. Повышение эффективности централизованных систем пожаротушения самолета // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 1. С. 98–106. DOI: 10.34759/vst-2023-1-98-106

Original article

INCREASING THE EFFICIENCY OF AIRCRAFT CENTRALIZED FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS

Artem G. Ageev¹✉, Anastasiya P. Galanova²

^{1,2} Company “Tupolev”,
Moscow, Russia

¹ snaker-tema@mail.ru ✉

² naiagalanova@gmail.com

Abstract. With the advent of microelectronics and implementation of microcontrollers in aircraft fire protecting systems, application of automation units based on electronic-digital components instead of relay components is becoming increasingly up-to-date. This allows interacting with aircraft equipment via the code line and perform more effectively the functions of detecting and employing fire alarms in aircraft compartments. Besides, application of digital systems provides new opportunities for creating fire extinguishing system control algorithms and generating signal information logic, which cannot be implemented when arranging blocks with relay components, resulting in a large mass and the need to arrange complexly branched computational circuits for the implementation of algorithmic and computed sequences.

The authors determined that most aircraft employed balloon-type fire extinguishing systems. At the same time, fire extinguishers are being initially divided into sequential fire extinguishing queues consisting of several cylinders, regardless of the compartment in which the fire eventuated.

The purpose of this study consisted in developing a new approach to the fire extinguishing queues selection in terms of creating the most effective conditions for extinguishing a fire in each fire hazardous compartment of an aircraft.

The numerical method was applied to compute hydraulic losses and find the average pressures created at the outlets from the orifices of the spray collectors in the fire hazardous compartments of the aircraft.

While further scientific research, a fundamentally new, combinatorial approach to the fire extinguishing queues selection was developed, which allows increasing the fire protection system efficiency in the event of a fire in the aircraft compartments, and meets the latest trends in the development of digital fire-fighting automation systems. An algorithm for the fire extinguishing queues forming has been developed within the framework of the combinatorial approach, which is of adaptive character, where the combination of fire extinguishers can be changed with account for possible leaks in the cylinders.

Keywords: aircraft fire extinguishing system, fire extinguisher, fire hazardous compartment, hydraulic losses, combinatorial analysis, fire extinguishing queue

For citation: Ageev A.G., Galanova A.P. Increasing the Efficiency of Aircraft Centralized Fire Extinguishing Systems. *Aerospace MAI Journal*. 2023. vol. 30. no. 1. С. 98–106. DOI: 10.34759/vst-2023-1-98-106

Введение

Одним из главных мероприятий, обеспечивающих безопасность полетов на летательном аппарате, является создание условий, при которых предотвращается возможность возникновения и распространения пожара [1–5].

Противопожарная система большинства современных самолетов специальной и транспортной категории состоит из системы пожарной сигнализации (СПС) и системы пожаротушения (СПТ).

С развитием микроэлектроники и применением микроконтроллеров, всё более актуальным становится использование в составе СПС блоков пожарной автоматики электронно-цифровых компонентов вместо релейных, что позволяет взаимодействовать с самолетными системами по кодовым линиям связи и более эффективно выполнять функции по обнаружению и ликвидации пожара в отсеках летательного аппарата. Кроме того, использование цифровых систем дает новые возможности для создания алгоритмов управления СПТ и формирования логики сигнальной информации, что невозможно осуществить при использовании блоков с релейными компонентами, ввиду их большой массы и необходимости компоновки на борту сложно разветвленных электрических цепей для реализации алгоритмических и логических последовательностей.

Системы пожаротушения самолета

На современных образцах авиационной техники можно выделить два типа СПТ с точки зрения расположения огнетушителей на борту: централизованные и автономные [6]. На зарубежных самолетах, например Airbus A320 и Boeing 747, наряду с централизованными системами, широко используются автономные СПТ [7–10]. При этом для каждого отсека установлены индивидуальные стационарные огнетушители, что в целом повышает эффективность СПС и СПТ, однако это

сопряжено с рядом существенных недостатков, таких как необходимость компоновки на борту большого количества баллонов для каждого пожароопасного отсека, невозможность использования незадействованных баллонов других отсеков в случае отказа автономных баллонов. На большинстве отечественных воздушных судов используются централизованные СПТ [11], в связи с повышенными требованиями отказобезопасности, а также из-за ограниченных возможностей компоновки баллонов на борту. В этом случае общие для всех пожароопасных отсеков огнетушители изначально разделены на последовательно срабатывающие очереди пожаротушения в составе нескольких баллонов независимо от того, в каком отсеке произошло возгорание (рис. 1). Так, например, на самолетах Ту-154 и Ту-155 используются три очереди пожаротушения по три баллона в каждой, на самолетах Ту-204 и Ту-214 — три очереди по два баллона в каждой, на самолете Ил-76 благодаря возможности компоновки баллонов большого объема — три очереди по одному баллону [12, 13].

Огнетушители первой очереди срабатывают автоматически по сигналам от системы сигнализации при возникновении пожара в отсеке. Однако у членов экипажа есть возможность включить первую очередь пожаротушения вручную при отсутствии или неисправности системы сигнализации. Огнетушители второй и последующих очередей включаются вручную.

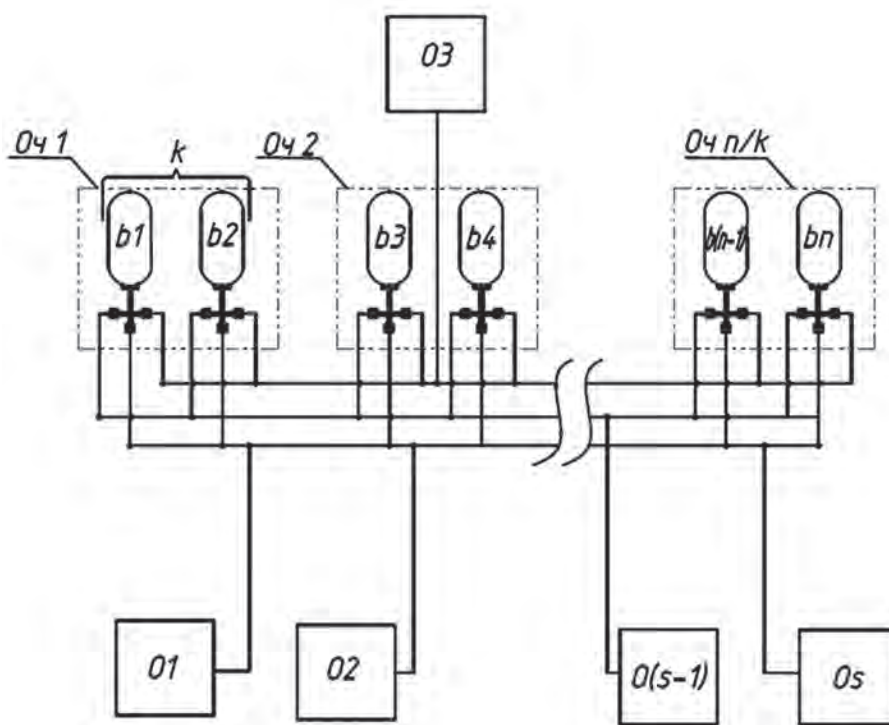


Рис. 1. Централизованные СПТ

Большинство отечественных летательных аппаратов транспортного и специального назначения имеют в СПТ три очереди огнетушителей. При этом авиационными правилами и нормами летной годности регламентировано наличие не менее двух очередей пожаротушения, первая из которых должна иметь возможность включения в автоматическом режиме. Огнетушители срабатывают при поступлении из системы сигнализации соответствующего сигнала на подрыв пиропатрона, расположенного на пироголовке баллона.

В настоящее время в централизованных СПТ, независимо от того, в каком отсеке возник пожар, команда управления на подрыв пиропатрона приходит на определенную комбинацию баллонов, т.е. на этапе разработки определены комбинации баллонов для первой и последующих очередей, являющиеся общими для всех пожароопасных отсеков. Недостаток такого способа состоит в том, что концентрация и давление огнегасящего вещества в пожароопасном отсеке, как и эффективность пожаротушения в целом, будет различной в зависимости от того, как расположены баллоны относительно отсеков и какую конфигурацию имеют магистральные трубопроводы и распылительные коллекторы. Для каждого пожароопасного отсека будет индивидуальное понятие очереди пожаротушения. Кроме того, из-за возможных утечек из баллона или из-за возникновения отказов наиболее эффективная комбинация баллонов может изменяться в процессе выполнения полета.

Цель данного исследования состоит в разработке нового подхода к выбору очередей пожаротушения с точки зрения создания наиболее эффективных условий для тушения пожара в каждом пожароопасном отсеке летательного аппарата с централизованной СПТ. В ходе дальнейшего научного исследования разработан принципиально новый, комбинаторный подход к выбору очередей пожаротушения, позволяющий повысить эффективность СПС при возникновении пожара в отсеках самолета, способствующий повышению отказобезопасности и надежности системы и соответствующий последним тенденциям развития цифровых систем противопожарной автоматики.

Комбинаторный подход при выборе очередей пожаротушения

Для примера разобрана ситуация, при которой в СПТ используются три очереди по два огнетушителя в каждой, а на летательном аппарате определены три пожароопасных отсека: O_1 , O_2 и O_3 (рис. 2), где $O_{1...s}$ — номер отсека; s — количество пожароопасных отсеков.

В настоящий момент на самолетах широко реализуется схема, при которой, например, первый и второй баллоны относятся к первой очереди пожаротушения, третий и четвертый — ко второй, а пятый и шестой — к третьей. При этом комбинации огнетушителей являются общими для всех трех пожароопасных отсеков и не меняются в случае утечки огнегасящего вещества из баллона. Например, если произошла утечка в третьем баллоне, то четвертый баллон не будет израсходован, а тушение пожара, после срабатывания первой очереди и при повторном возгорании, будет осуществляться с помощью третьей очереди.

С точки зрения создания максимально возможной концентрации и, как следствие, давления огнегасящего вещества в пожароопасном отсеке, комбинации баллонов для первой, второй и третьей очереди будут индивидуальными для каждого пожароопасного отсека.

Для определения наиболее эффективных комбинаций баллонов по создаваемому в отсеках давлению огнегасящего вещества нами проведен расчет данного параметра на каждой ветке распылительных коллекторов для каждой возможной комбинации баллонов. Имея в сумме n баллонов и при условии срабатывания k из них в одной очереди, можно определить количество возможных комбинаций срабатывания для каждого отсека [14]:

$$\frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (1)$$

В нашем случае $n = 6$, $k = 2$. В качестве огнегасящего вещества использовался хладон 114В2.

Однако необходимо учитывать, что в случае утечки или возникновения отказа возможно срабатывание только одного из двух баллонов очереди. В общем случае для n баллонов возможно срабатывание от 1 до k баллонов в очереди. При этом количество возможных комбинаций вычисляется по формуле

$$\sum_{i=1}^k \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (2)$$

Далее численным методом проведен расчет гидравлических потерь и найдены создаваемые средние давления на выходах из отверстий распылительных коллекторов в каждом из трех пожароопасных отсеков [15–20].

С помощью уравнения сплошности были определены средние скорости движения огнегасящего вещества для каждого участка трубопровода.

С помощью формул Альтшуля и Никурадзе–Лиса были найдены коэффициенты потерь по длине каждой из труб. Расчетные значения

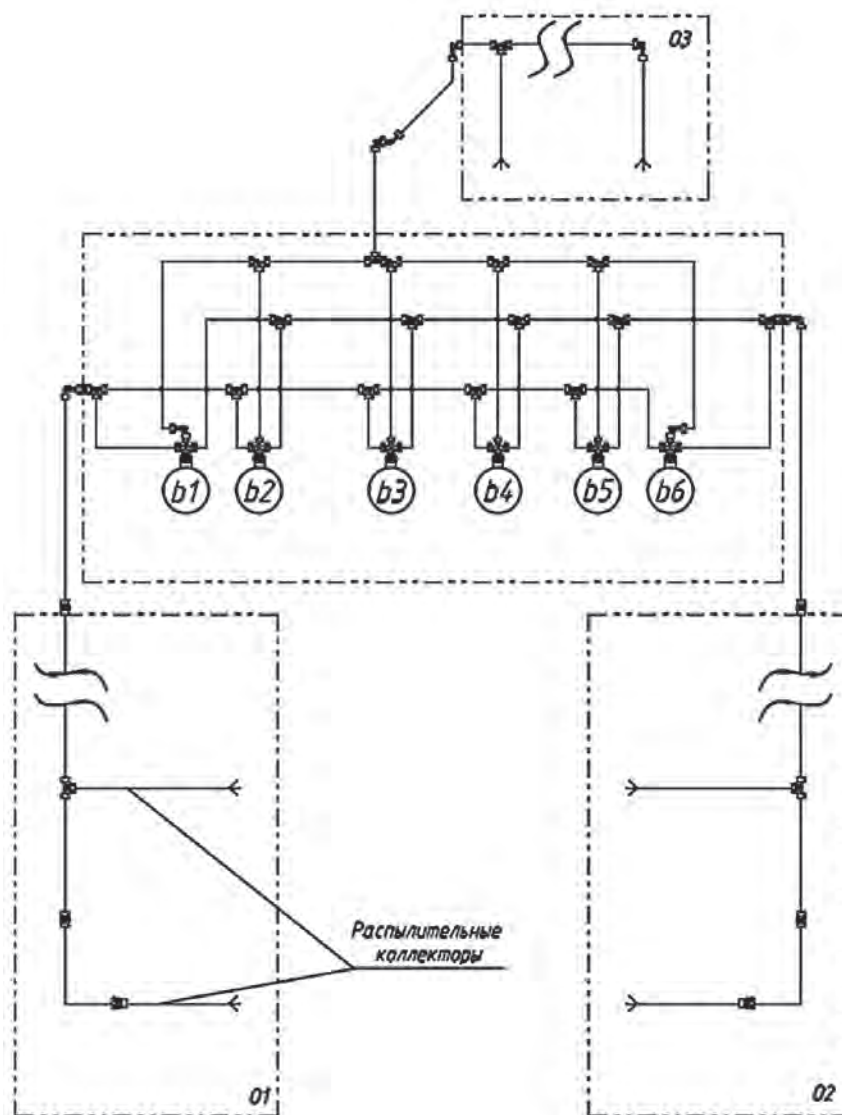


Рис. 2. Расчетная СПТ

коэффициентов по длине позволяют определить гидравлические потери.

Расчет гидравлических потерь по длине проводился с помощью формулы Дарси–Вейсбаха. Не менее значимые потери напора в трубопроводе будут вносить тройники, колени, повороты и отверстия, создавая местные сопротивления. Местные потери связаны с тем, что, проходя местные сопротивления, поток изменяет форму, появляются вихревые зоны, что приводит к резкому понижению напора в месте нахождения местного сопротивления.

С помощью формулы Вейсбаха были определены потери на местные сопротивления трубопровода (тройники, колени, повороты, отверстия).

Далее с помощью уравнения Бернулли были найдены давления на выходах из отверстий распылительных коллекторов.

По результатам расчета массива создаваемых давлений огнегасящего вещества на выходах из отверстий распылительных коллекторов определены возможные комбинации баллонов (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что, например, для отсека O_3 первой очередью пожаротушения должна быть комбинация не первого и второго, а третьего и четвертого баллонов, второй очередью вместо комбинации третьего и четвертого баллонов является комбинация второго и пятого, а третьей очередью — комбинация первого и шестого вместо комбинации пятого и шестого баллонов (рис. 3).

При этом из-за недостаточного давления в огнетушителях, например в случае утечек огнегасящего вещества в процессе полета, повреждения или прострела, комбинации баллонов могут быть и другими, в зависимости от того, в каких из баллонов давление выше нормы, а давление на выходе из от-

Таблица 1

Возможные комбинации баллонов для формирования очередей пожаротушения

Комбинация баллонов	b_1, b_1	b_1, b_2	b_1, b_3	b_1, b_4	b_1, b_5
Массив $m(1...s)$	$m(2,3)11$	$m(2,3)12$	$m(2,3)13$	$m(2,3)14$	$m(2,3)15$
Давление на выходе в отсеке O_3 , МПа	10,45	25,15	25,31	25,46	25,58
Комбинация баллонов	b_1, b_6	b_2, b_2	b_2, b_3	b_2, b_4	b_2, b_5
Массив $m(1...s)$	$m(2,3)16$	$m(2,3)22$	$m(2,3)23$	$m(2,3)24$	$m(2,3)25$
Давление на выходе в отсеке O_3 , МПа	10,61	25,41	25,56	25,71	26,13
Комбинация баллонов	b_3, b_3	b_3, b_4	b_3, b_5	b_3, b_6	b_4, b_4
Массив $m(1...s)$	$m(2,3)33$	$m(2,3)34$	$m(2,3)35$	$m(2,3)36$	$m(2,3)44$
Давление на выходе в отсеке O_3 , МПа	11,01	25,65	25,79	26,21	11,09
Комбинация баллонов	b_4, b_5	b_4, b_6	b_5, b_5	b_5, b_6	b_6, b_6
Массив $m(1...s)$	$m(2,3)45$	$m(2,3)46$	$m(2,3)55$	$m(2,3)56$	$m(2,3)66$
Давление на выходе в отсеке O_3 , МПа	25,86	26,28	11,58	26,34	11,16

верстий распылительных коллекторов принимает наибольшее значение.

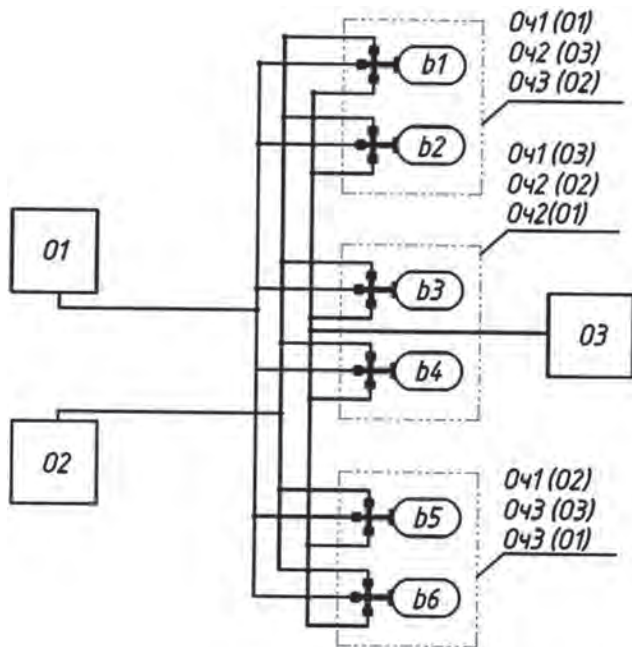


Рис. 3. Комбинаторный подход к выбору очередей пожаротушения

Адаптивный принцип комбинаторного подхода при выборе очередей пожаротушения

В процессе работы блок управления проводит проверку, по результатам которой исключает баллоны из возможных комбинаций по причине недостаточного давления в них для срабатывания очереди, по алгоритму согласно табл. 2.

Пусть u — выведенное после проверки количество баллонов, у которых давление меньше нормы и которые исключены из возможных комбинаций для срабатывания очередей пожаротушения. Таким образом, блок пожарной автоматики формирует u сигналов от баллонов «Давление в баллоне $b_{(1...n)}$ меньше нормы».

Таблица 2

Алгоритм исключения баллонов из возможных комбинаций для срабатывания очередей пожаротушения

Наличие сигнала «Давление в баллоне $b_{(1...n)}$ меньше нормы»	
Да	Нет
Исключить из всех массивов $m(1...s)$ элементы, содержащие в себе номер проверяемого баллона b_i . Например: Исключить из массива « $m(1...s)$ » элементы $m(1...s)(1...n)b_i$ и $m(1...s)b_i(1...n)$; Переход к проверке следующего баллона	Переход к проверке следующего баллона

По результатам проведенной проверки подсчитывается количество элементов в массивах (табл. 3), необходимое в будущем для формирования команд управления «Подрыв пиропатрона».

Таблица 3

Количество элементов (возможных комбинаций) в каждом массиве давлений $m(1...s)$

Для $u \leq (n - k)$	Для $(n - k + 1) \leq u \leq (n - l)$	Для $u = n$
$\sum_{i=1}^k \frac{n-u!}{i!(n-u-i)!}$	$\sum_{i=1}^{n-u} \frac{n-u!}{i!(n-u-i)!}$	0

При недостаточном давлении в некоторых огнетушителях комбинации баллонов могут быть и другими, а алгоритм формирования сигналов о разрядке очередей и выдаче сигналов на подрыв пиропатронов огнетушителей принимает адаптивный характер.

При комбинаторно-адаптивном подходе блок управления пожарной защитой должен формировать $\frac{n}{k}$ сигналов «ОЧЕРЕДЬ $(1... \frac{n}{k})$ разряжена» по следующему алгоритму:

1. Формирование сигнала «ОЧЕРЕДЬ 1 разряжена»:

условие — [количество сигналов «Давление в баллоне $b_{(1...n)}$ меньше нормы» больше одного (включительно) ($u \geq 1$)].

Таблица 4

Формирование команд управления «Подрыв пиропатрона» при пожаре в отсеке $O_{(1...s)}$

Автоматическое включение очереди 1 пожаротушения	$u = 0$	1. Поиск наибольшего значения в каждом массиве $m(1...s)$. 2. Выдача команды на подрыв пиропатронов для комбинации баллонов с наибольшим значением в массиве $m(1...s)$
Ручное включение очередей пожаротушения	$u = 0$	1. Поиск наибольшего значения в каждом массиве. 2. Наличие сигнала о нажатии кнопки «ОЧЕРЕДЬ 1». 3. Выдача команды на подрыв пиропатронов для комбинации баллонов с наибольшим значением в массиве
	от $u = 1$ до $u = (n - k)$	1. Формирование сигнала «ОЧЕРЕДЬ $1... \left(\frac{n}{k} - 1\right)$ разряжена». 2. Поиск наибольшего значения в каждом массиве. 3. Наличие сигнала о нажатии кнопки «ОЧЕРЕДЬ $2... \frac{n}{k}$ ». 4. Выдача команды на подрыв пиропатронов для комбинации баллонов с наибольшим значением в массиве
	от $u = (n - k + 1)$ до $u = (n - 1)$	1. Формирование сигнала «ОЧЕРЕДЬ $\frac{n}{k}$ давление меньше нормы». 2. Поиск наибольшего значения в каждом массиве. 3. Наличие сигнала о нажатии кнопки «ОЧЕРЕДЬ $\frac{n}{k}$ ». 4. Выдача команды на подрыв пиропатронов для комбинации баллонов с наибольшим значением в массиве
	$u = n$	Формирование сигнала «ОЧЕРЕДЬ $\frac{n}{k}$ разряжена»

2. Формирование сигнала «ОЧЕРЕДЬ j разряжена», при условии $\frac{n}{k} \geq j \geq 2$:

условие — [наличие сигнала «ОЧЕРЕДЬ $(j - 1)$ разряжена»] и $[u \geq (j - 1) * k + 1]$, где j — текущий номер очереди.

Таким образом, выдача команд управления на подрыв пиропатронов огнетушителей для подачи

огнегасящего вещества в отсеки в случае пожара осуществляется блоком управления пожарной защиты (табл. 4), с учетом наличия давления в баллонах и на основе массива данных об эффективности той или иной комбинации баллонов по данным из табл. 1, 2 и 3. То есть блок автоматики осуществляет поиск наибольшего значения в массиве давлений для

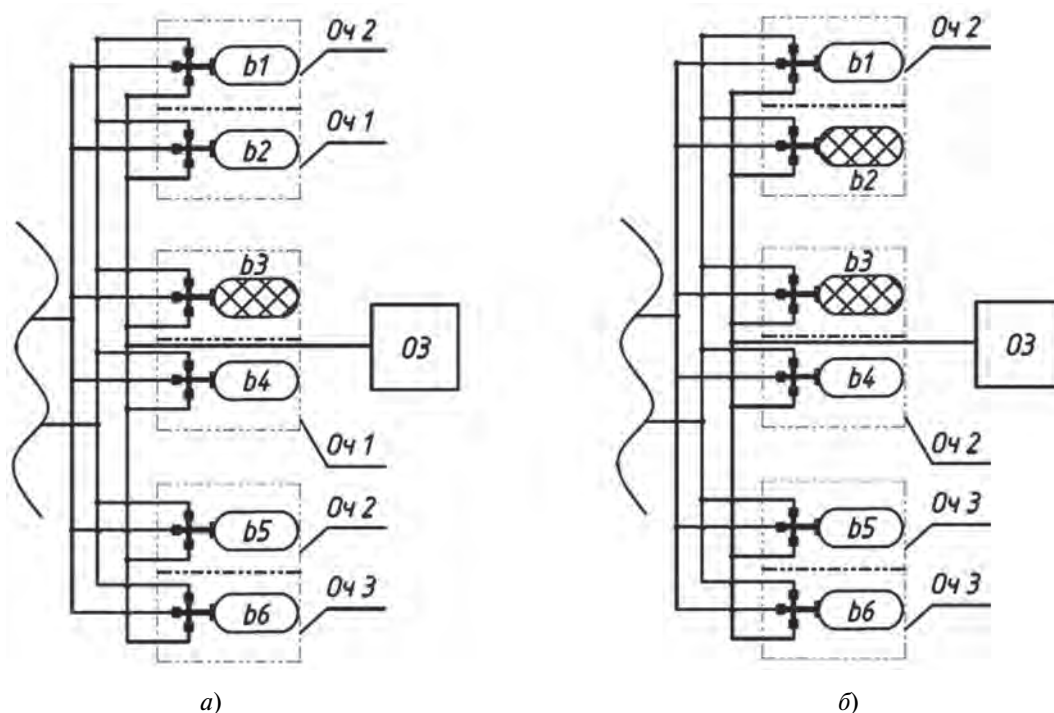


Рис. 4. Комбинаторно-адаптивный подход к выбору очередей пожаротушения на примере отсека O_3 ; а — утечка в третьем баллоне; б — утечка во втором и третьем баллонах

отсека $O_{1...3}$, где произошло возгорание, и выдает команду управления на подрыв пиропатронов соответствующей комбинации баллонов.

Рассмотрим выдачу команд управления на подрыв пиропатронов огнетушителей в случае пожара в отсеке O_3 . Допустим, что в третьем баллоне произошла утечка огнегасящего вещества с выдачей в блок управления пожарной защитой сигнала «Давление в баллоне 3 меньше нормы». На основании этих данных, последовательность срабатывания очередей пожаротушения следующая: первая очередь (автоматическая) — разряжена (из-за недостатка давления в третьем баллоне), первая очередь (ручная) — второй и четвертый баллоны, вторая очередь (ручная) — первый и пятый баллоны, третья очередь (ручная) — шестой баллон (рис. 4,а). Если утечка огнегасящего вещества произошла во втором и третьем баллонах, то блок управления пожарной защиты изменит последовательность срабатывания очередей пожаротушения на следующую: первая очередь (автоматическая, ручная) — разряжена (из-за недостатка давления во втором и третьем баллонах), вторая очередь (ручная) — первый и четвертый баллоны, третья очередь (ручная) — пятый и шестой баллоны (рис. 4,б). То есть происходит адаптация алгоритма (последовательности) срабатывания очередей пожаротушения, что характеризует комбинаторно-адаптивный подход.

Выводы

1. В ходе проведенного научного исследования разработан принципиально новый, комбинаторный, подход к выбору очередей пожаротушения, позволяющий повысить эффективность централизованных СПТ при возникновении пожара в отсеках самолета, отвечающий последним тенденциям развития цифровых систем противопожарной автоматики и имеющий адаптивный характер, при котором порядок разрядки очередей пожаротушения может меняться с учетом возможных утечек в баллонах, что повышает отказобезопасность и надежность системы;

2. Использование в централизованных СПТ предложенной схемы разрядки очередей пожаротушения приводит к росту среднего давления на выходах из отверстий распылительных коллекторов по сравнению с применяемыми в настоящее время схемами и позволяет воспользоваться всеми оставшимися под давлением баллонами в случае неисправности одного из них в каждой очереди пожаротушения, что невозможно сделать при использовании традиционного метода.

Список источников

1. Convention of International Civil Aviation — Doc 7300. Annex 6 — Operation of Aircraft. Part 1, International Commercial Air Transport — Aeroplanes. — Eleventh Edition, 2018. — 292 p.
2. Межгосударственный авиационный комитет. Авиационные Правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. — 6-е издание с поправками 1–9. — М.: Авиаздат, 2020. — 328 с.
3. Мешман Л.М., Цариченко С.Г., Былинкин В.А. и др. Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения. — М.: ВНИИПО МЧС РФ, 2002. — 413 с.
4. Болотин Е.Т., Мажара И.И., Пестмалъ Н.Ф. Проектирование установок автоматического пожаротушения: Учебник. — М.: Академия ГПС МЧС России, 2007. — 298 с.
5. Карпышев А.В. Высокоэффективные установки пожаротушения тонкораспыленной водой на основе аэрокосмических технологий // Вестник Московского авиационного института. 2005. Т. 12. № 2. С. 145–148.
6. Лужецкий В.К. Противопожарная защита самолетов гражданской авиации. — М.: Транспорт, 1987. — 144 с.
7. Sham H. Fire Protection: Engines and Auxiliary Power Units // Boeing. 2010. No. 4, 32 p.
8. Hipsher C., Ferguson D.E. Fire Protection: Cargo Compartments // Boeing. 2011. No. 2, 32 p.
9. Тихонов А.Н. Противопожарная система самолета А320. Система кондиционирования воздуха самолета А320. — Самара: СГАУ, 2013. — 590 с.
10. Beall K., Grosshandler W., Luck H. New approaches to aircraft fire protection // 12th International Conference on Automatic Fire Detection (25–28 March 2001; Maryland, USA). URL: http://www.khayma.com/jordanfirenet/info_center/Aircraft_Fire_Protection.pdf
11. Мещерякова Т.П. Проектирование систем защиты самолетов и вертолетов: Учебное пособие. — М.: Машиностроение, 1977. — 232 с.
12. Волошин Ф.А., Кузнецов А.Н., Покровский В.Я., Соловьев А.Я. Самолет Ту-154. Конструкция и техническое обслуживание. — Книга 2. — М.: Машиностроение, 1976. — 250 с.
13. Андреев В.А., Борисов В.Д., Климов В.Т. и др. Внимание: газы. Криогенное топливо для авиации. — М.: Московский рабочий, 2001. — 224 с.
14. Виленкин Н.Я., Виленкин А.Н., Виленкин П.А. Комбинаторика. — М.: ФИМА, МЦНМО, 2006. — 400 с.
15. Некрасов Б.Б. Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах: Учебник. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1967. — 368 с.
16. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.
17. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник. — 2-е изд., перераб. — М.: Машиностроение, 1982. — 423 с.
18. Матвеевко А.М., Чаплыгин В.Я. Исследование течения жидкости в несимметричных гидравлических каналах // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 1. С. 58–64.

19. Краев В.М. Физическая модель гидродинамически нестационарного турбулентного потока // Вестник Московского авиационного института. 2007. Т. 14. № 3. С. 48–51.
20. Лобанов И.Е., Низовитин А.А., Флейтлик Б.Б. Математическое моделирование предельного изотермического гидравлического сопротивления в условиях интенсификации теплообмена за счет турбулизации потока в шероховатых трубах малого диаметра // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 5. С. 105–110.
9. Tikhonov A.N. *Protivopozharnaya sistema samoleta A320. Sistema konditsionirovaniya vozdukha samoleta A320* (Fire-fighting system of the A320 aircraft. Air conditioning system of the A320 aircraft), Samara, SGAU, 2013, 590 p.
10. Beall K., Grosshandler W., Luck H. New approaches to aircraft fire protection. *12th International Conference on Automatic Fire Detection (25–28 March 2001; Maryland, USA)*. URL: http://www.khayma.com/jordanfirenet/info_center/Aircraft_Fire_Protection.pdf
11. Meshcheryakova T.P. *Proektirovanie sistem zashchity samoletov i vertoletov* (Design of aircraft and helicopter protection systems), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 232 p.
12. Voloshin F.A., Kuznetsov A.N. Pokrovskii V.Ya., Solov'ev A.Ya. *Samolet Tu-154. Konstruktsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Kniga 2* (Tu-154 aircraft. Structure and maintenance. Book 2), Moscow, Mashinostroenie, 1976, 250 p.
13. Andreev V.A., Borisov V.D., Klimov V.T. et al. *Vnimanie: gazy. Kriogennoe toplivo dlya aviatsii* (Attention: gases. Cryogenic fuel for aviation), Moscow, Moskovskii rabochii, 2001, 224 p.
14. Vilenkin N.Ya., Vilenkin A.N., Vilenkin P.A. *Kombinatorika* (Combinatorics), Moscow, FIMA, MTsNMO, 2006, 400 p.
15. Nekrasov B.B. *Gidravlika i ee primeneniye na letatel'nykh apparatakh* (Hydraulics and its application on aircraft), 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie, 1967, 368 p.
16. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* (Handbook of hydraulic resistances), 3-rd ed. Moscow, Mashinostroenie, 1992, 672 p.
17. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* (Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives), 2-nd ed. Moscow, Mashinostroenie, 1982, 423 p.
18. Matveenko A.M., Chaplugin V.J. The study of fluid flow in an asymmetric hydraulic channels. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 58–64.
19. Kraev V.M. A physical model for a hydrodynamically non-steady turbulent flow. *Aerospace MAI Journal*, 2007, vol. 14, no. 3, pp. 48–51.
20. Lobanov I.E., Nizovitin A.A., Fleytlikh B.B. Mathematical modeling of limit insulated hydraulic resistance in turbulent flow through turbulence in rough pipes of small diameter. *Aerospace MAI Journal*, 2010, vol. 17, no. 5, pp. 105–110.

References

1. *Convention of International Civil Aviation — Doc 7300. Annex 6 — Operation of Aircraft. Part 1, International Commercial Air Transport — Aeroplanes*. Eleventh Edition, 2018, 292 p.
2. *Mezhgosudarstvennyi aviatsionnyi komitet. Aviatsionnye Pravila. Chast' 25. Normy letnoi godnosti samoletov transportnoi kategorii, 6-e izdanie s popravkami 1-9* (Interstate Aviation Committee. Civil Aviation Safety Regulations. Part 25 — Airworthiness standards: transport category airplanes, 6th edition with amendments 1–9), Moscow, Aviaizdat, 2020, 328 p.
3. Meshman L.M., Tsarichenko S.G., Bylinkin V.A. et al. *Proektirovanie vodyanykh i pennykh avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya* (Design of water and foam automatic fire extinguishing systems), Moscow, VNIPO MChS RF, 2002, 413 p.
4. Bolotin E.T., Mazhara I.I., Pestmal' N.F. *Proektirovanie ustanovok avtomaticheskogo pozharotusheniya* (Design of automatic fire extinguishing installations), Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii, 2007, 298 p.
5. Karpyshev A.V. High-efficiency devices based on aerospace technologies for fire-fighting by means a fine-air water. *Aerospace MAI Journal*, 2005, vol. 12, no. 2, pp. 145–148.
6. Luzhetskii V.K. *Protivopozharnaya zashchita samoletov grazhdanskoi aviatsii* (Fire protection of civil aviation aircraft), Moscow, Transport, 1987, 144 p.
7. Sham H. Fire Protection: Engines and Auxiliary Power Units. *Boeing*, 2010, no. 4, 32 p.
8. Hipsher C., Ferguson D.E. Fire Protection: Cargo Compartments. *Boeing*, 2011, no. 2, 32 p.

Статья поступила в редакцию 24.12.2022; одобрена после рецензирования 16.02.2023; принята к публикации 17.02.2023.

The article was submitted on 24.12.2022; approved after reviewing on 16.02.2023; accepted for publication on 17.02.2023.