

УДК 629.735.083

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЛЕКТА ЗАПАСНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕГУЛЯРНОСТИ ВЫЛЕТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Е.Д. ГЕРАСИМОВА, И.Ф. ПОЛЯКОВА, В.С. КИРДЮШКИН

Статья представлена доктором технических наук, профессором Чинючиным Ю.М.

Рассматривается метод формирования комплекта запасных изделий, включающий оптимизацию по критерию его достаточности, с целью обеспечения регулярности вылетов ВС ГА.

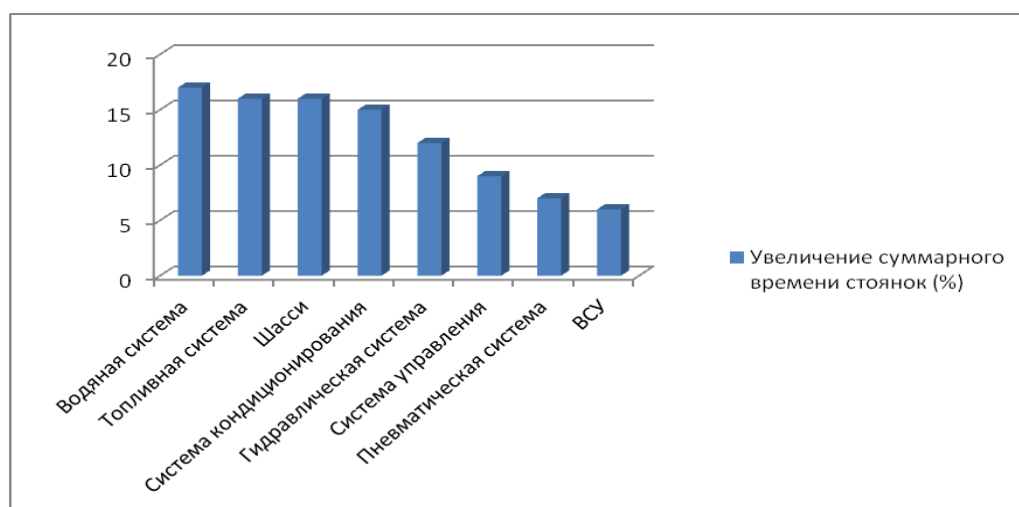
**Ключевые слова:** регулярность вылетов, запасные изделия, стратегия пополнения, достаточность.

Формирование комплекта запасных изделий для поддержания ВС в исправном состоянии относится к системе материально-технического обеспечения (МТО) в ГА. Системный подход подробно рассмотрен в [1], где показано, что недооценка системы МТО может привести к увеличению простоев ВС, снижению интенсивности использования и регулярности вылетов.

Остановимся на одном из аспектов – проблеме обеспечения регулярности вылетов, которая приобретает все большее значение для авиакомпаний РФ, эксплуатирующих многочисленные парки отечественных и зарубежных ВС. Один из способов решения проблемы – исключение задержек по причине отказов изделий функциональных систем (ФС), выявленных в полете и при оперативном техническом обслуживании (ТО) и подлежащих немедленному устранению.

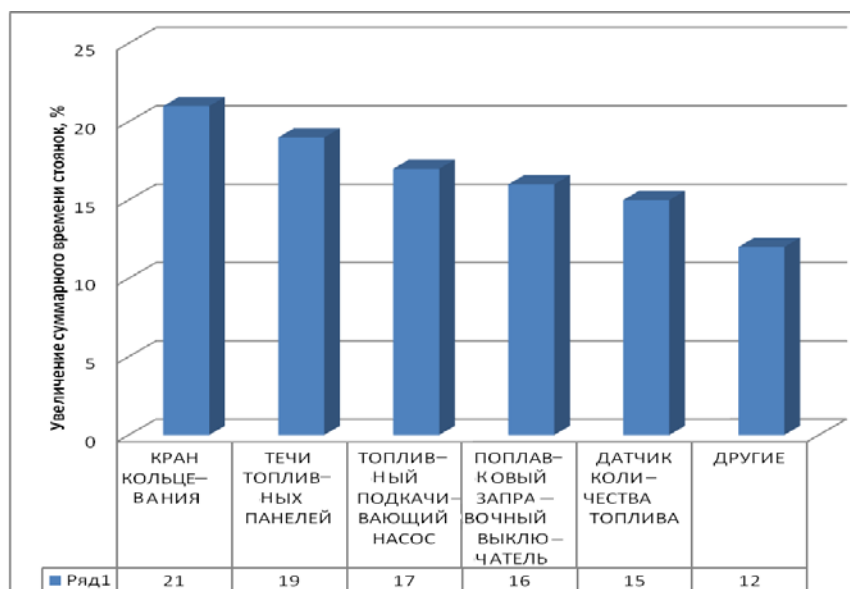
Отсутствие достаточного комплекта запасных изделий приводит к увеличению времени стоянки ВС, что подтверждается статистическими наблюдениями.

Так, например, с целью совершенствования процессов оперативного ТО Б-737 в условиях авиакомпании «Трансаэро» анализировалась статистика по отказам ФС за период 2012-2013 гг. и их влияние на регулярность вылетов. Установлено, что устранение отказов ФС Б-737 при оперативном ТО приводило к увеличению времени стоянки и наличию задержек вылетов. На рис. 1 представлена статистика по увеличению суммарного времени стоянок в процентном отношении к общему количеству вылетов за рассматриваемый период.



**Рис. 1.** Увеличение суммарного времени стоянок при оперативном ТО из-за отказов ФС Б-737

Для каждой ФС были выделены изделия, отказы которых в наибольшей степени влияли на увеличение времени стоянки Б-737 и приводили к задержкам вылетов. Для иллюстрации на рис. 2 представлены результаты статистических наблюдений для топливной системы.



**Рис. 2.** Увеличение времени стоянок из-за отказов топливной системы Б-737

В данной статье рассматриваются особенности метода формирования комплекта запасных изделий ВС, учитывающие его достаточность для исключения задержек вылетов.

Подлежат решению следующие задачи:

- 1) определение структуры комплекта запасных изделий, т.е. номенклатура изделий ФС, требующих наиболее частых замен;
- 2) рассмотрение стратегий пополнения комплекта запасных изделий, наиболее выгодных по стоимости для авиакомпании;
- 3) определение достаточности запасных изделий;
- 4) оптимизация комплекта запасных изделий.

В практике обеспечения ВС запасными изделиями используются одиночные и групповые комплекты. Одиночный – комплект запасных изделий, придаваемый одному объекту; групповой – для снабжения запасными изделиями нескольких объектов. По мере расходования запасных изделий комплект должен пополняться, при этом могут быть использованы следующие стратегии пополнения [2]:

- 1) периодическое пополнение (запасные изделия восстанавливаются через фиксированные интервалы времени – плановое восстановление); характеристика – период пополнения;
- 2) периодическое пополнение с экстренными доставками (плановое и внеплановое восстановление); характеристики – период пополнения и средняя продолжительность доставки;
- 3) восстановление отказавших изделий на ремонтном предприятии с последующим возвратом; характеристика – среднее время ремонта;
- 4) непрерывное пополнение (поставка (n-k) изделий, где n – начальный уровень, k – минимально допустимый уровень запаса); характеристика – уровень (k) и средняя продолжительность поставки.

Для оценки достаточности запасных изделий в комплекте предлагается использовать показатели: K – коэффициент готовности (средняя по времени вероятность того, что запасные изделия находятся в безотказном состоянии); R – вероятность достаточности количества запасных изделий (вероятность того, что за время работы ФС не случится ни одного отказа запасных изделий).

Таким образом, задачей оптимизации комплекта запасных изделий является условная оптимизация типа

$$\min\{C(x)/F(x) \geq F_0\},$$

где  $C(x)$  – стоимость комплекта запасных изделий ( $x$  – количество изделий в комплекте);  $F(x)$  – показатель достаточности комплекта из  $x$  изделий;  $F_0$  – заданное ограничение на показатель достаточности.

Задача оптимизации комплекта запасных изделий решалась с помощью автоматизированной системы «ДИАНА» [3]. В режиме «оптимизация ЗИП» предусмотрено вычисление показателей достаточности и оптимизация комплекта запасных изделий в предположении, что время между отказами изделий распределено по экспоненциальному закону и отказы независимы. В процессе расчета строится зависимость  $F(C)$  и фиксируются те вектора  $X$ , которые соответствуют каждой из точек этой зависимости. Множество векторов  $X$  называется «недоминируемой последовательностью» (НДП). Каждый вектор  $X$  образует точку НДП с координатами  $(C(x); F(x))$ . При оптимизации выбирается такая точка НДП, для которой  $F(x) \geq F_0$ .

Исходной информацией является:

- структура комплекта запасных изделий;
- стратегия пополнения запасных изделий;
- общее количество однотипных изделий в ФС;
- интенсивность отказов (замен) изделий при оперативном ТО, приведших к задержке вылетов.

Технология формирования комплекта запасных изделий с использованием системы «ДИАНА» включает последовательное выполнение следующих действий:

- 1) ввод исходной информации для расчета показателей достаточности;
- 2) ввод исходной информации для оптимизации комплекта запасных изделий;
- 3) расчет показателей достаточности;
- 4) расчет оптимального количества запасных изделий;
- 5) просмотр результатов оптимизации.

В результате расчета получают график НДП с указанием точек, полученных при оптимизации (по оси ординат – значение показателя достаточности, а по оси абсцисс – цена комплекта запасных изделий).

Особенностью предлагаемого метода является то, что он позволяет формировать оптимальный комплект запасных изделий индивидуально для каждого типа изделий ФС с учетом интенсивности замены изделий при оперативном ТО и покупной стоимости изделия. Также появляется возможность исследовать рассмотренные выше стратегии пополнения запасных изделий и выбрать минимальную по стоимости для конкретного типа изделия ФС.

Формирование оптимального комплекта запасных изделий продемонстрировано на примере топливной системы Б-737 по опыту эксплуатации парка в авиакомпании «Трансаэро» за период 2012-2013 гг. Рассматривались изделия топливной системы, отказы которых привели к увеличению времени стоянки при оперативном ТО Б-737 (табл. 1).

**Таблица 1**

Исходные данные для оптимизации комплекта запасных изделий топливной системы Б-737

| № п/п | Наименование изделия                | Кол-во на ВС, шт. | Стоимость изделия, руб. | Интенсивность замен |
|-------|-------------------------------------|-------------------|-------------------------|---------------------|
| 1     | Кран кольцевания                    | 1                 | 19 000                  | 0,0021              |
| 2     | Топливная панель                    | 12                | 6 500                   | 0,0019              |
| 3     | Подкачивающий топливный насос       | 6                 | 43 000                  | 0,0017              |
| 4     | Поплавковый заправочный выключатель | 3                 | 3 800                   | 0,0016              |
| 5     | Датчик количества топлива           | 6                 | 12 500                  | 0,0015              |

Перечень исследуемых стратегий пополнения и их характеристики представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики стратегий пополнения комплекта запасных изделий

| № п/п | Описание стратегии                                                                        | Характеристики стратегии пополнения                                 |                   | Код ввода в «ДИАНУ» |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|
|       |                                                                                           | наименование                                                        | значение          |                     |
| 1     | Периодическое пополнение (плановое восстановление каждый календарный месяц)               | Период пополнения (календарный месяц)                               | 720 ч             | 1 720               |
| 2     | Периодическое пополнение с экстренными доставками (плановое и внеплановое восстановление) | Период пополнения.<br>Продолжительность экстренной доставки (сутки) | 720 ч<br>24 ч     | 2 720 24            |
| 3     | Восстановление отказавших изделий на ремонтном предприятии                                | Среднее время ремонта (2 недели)                                    | 336 ч             | 3 336               |
| 4     | Непрерывное пополнение                                                                    | Минимальный уровень запаса К.<br>Средняя продолжительность поставки | 1 изделие<br>24 ч | 4 24 1              |

Проводилась оптимизация по стоимости комплекта запасных изделий для топливной системы (табл. 1) в случае применения каждой стратегии. Для построения НДП устанавливалось ограничение по достаточности ( $K \geq 0,9$ ). В табл. 3 представлены результаты расчета при использовании первой стратегии пополнения комплекта для всех типов изделий. Стоимость комплекта запасных изделий составила 646 100 руб.

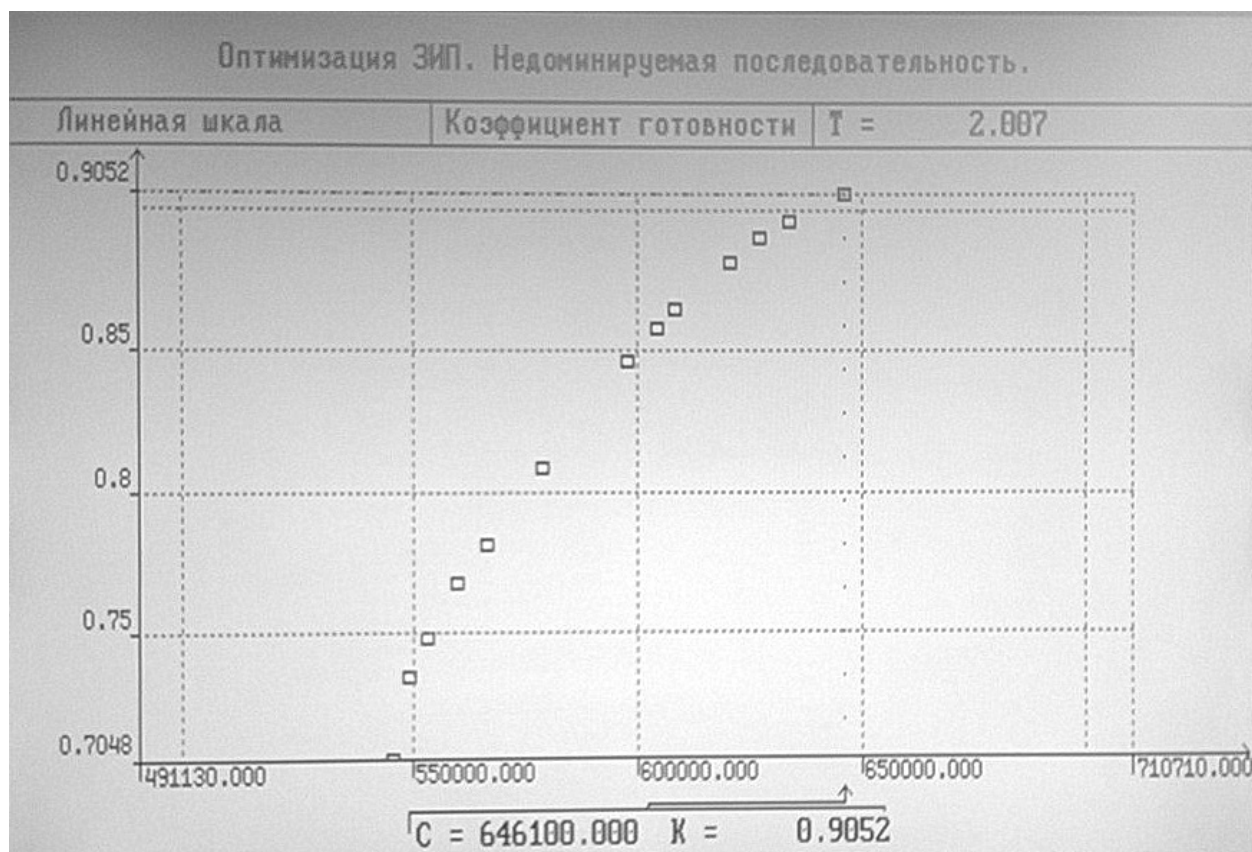
Таблица 3

Результаты оптимизации комплекта запасных изделий при первой стратегии пополнения

| Имя         | Кол-во на ВС | Интенсивность замен | Запасные изделия |      |      |            | Стратегия пополнения | Результаты оптимизации комплекта |           |            |
|-------------|--------------|---------------------|------------------|------|------|------------|----------------------|----------------------------------|-----------|------------|
|             |              |                     | min              | кол. | опт. | цена, руб. |                      | недостат.                        | кол. изд. | цена, руб. |
| MODEL       | **           | *****               | ***              | ***  | **** | *****      | *****                | 0,0947504                        | 48        | 646100     |
| Кран        | 1            | 0,0021              | 0                | --   | оп   | 19000      | 1 720                | 0,0165058                        | 3         | 57000      |
| Панель      | 12           | 0,0019              | 0                | --   | оп   | 6500       | 1 720                | 0,0114090                        | 21        | 136500     |
| Насос       | 5            | 0,0017              | 0                | --   | оп   | 43000      | 1 720                | 0,0564937                        | 7         | 301000     |
| Выключатель | 3            | 0,0016              | 0                | --   | оп   | 3800       | 1 720                | 0,0038939                        | 7         | 26600      |
| Датчик      | 6            | 0,0015              | 0                | --   | оп   | 12500      | 1 720                | 0,0093289                        | 10        | 125000     |

Примечание. MODEL – комплект запасных изделий для топливной системы Б-737.

На рис. 3 представлена НДП и получена точка, соответствующая заданным требованиям по достаточности ( $K = 0,9052$ ).



**Рис. 3.** Оптимизация комплекта запасных изделий при реализации ежемесячного пополнения (плановое восстановление)

Результаты расчета при использовании каждой из четырех стратегий сведены в табл. 4.

**Таблица 4**

Оптимизация комплекта запасных изделий топливной системы самолета Б-737 при различных стратегиях пополнения

| № стратегии пополнения              | 1            |            |        | 2            |            |        | 3            |            |        | 4                     |            |        |
|-------------------------------------|--------------|------------|--------|--------------|------------|--------|--------------|------------|--------|-----------------------|------------|--------|
|                                     | 1_720        |            |        | 2_720_24     |            |        | 3_336        |            |        | 4_24_1                |            |        |
| Код стратегии пополнения            | недостаточн. | количество | цена   | недостаточн. | количество | цена   | недостаточн. | количество | цена   | недостаточн.          | количество | цена   |
| Топливная система                   | 0,095        | 48         | 646100 | 0,098        | 29         | 342800 | 0,106        | 33         | 464000 | 0,03                  | 15         | 254400 |
| Кран кольцевания                    | 0,016        | 3          | 57100  | 0,007        | 2          | 38000  | 0,005        | 3          | 57000  | $3,8 \cdot e^{-0,05}$ | 3          | 57000  |
| Топливная панель                    | 0,011        | 21         | 136500 | 0,028        | 12         | 78000  | 0,013        | 13         | 84500  | 0,022                 | 3          | 19500  |
| Подкачивающий топливный насос       | 0,056        | 7          | 301000 | 0,049        | 3          | 129000 | 0,078        | 5          | 215000 | 0,003                 | 3          | 129000 |
| Поплавковый заправочный выключатель | 0,004        | 7          | 26600  | 0,002        | 6          | 22800  | 0,005        | 5          | 19000  | 0,0004                | 3          | 11400  |
| Датчик количества топлива           | 0,009        | 10         | 125000 | 0,016        | 6          | 75000  | 0,008        | 7          | 87500  | 0,002                 | 3          | 37500  |

Выявлено (табл. 4), что для каждого типа изделий топливной системы Б-737 оптимальной по стоимости является определенная стратегия пополнения:

- кран кольцевания – стратегия 2 (38 000 руб.);
- топливная панель – стратегия 4 (19 500 руб.);
- топливный насос – стратегия 2 (129 000 руб.);
- заправочный выключатель – стратегия 4 (11 400 руб.);
- датчик количества топлива – стратегия 4 (37 000 руб.).

Такой комбинированный подход к формированию комплекта запасных изделий топливной системы для обеспечения регулярности вылетов Б-737 наиболее рационален, т.к. стоимость комплекта является минимальной среди рассмотренных и составляет 192 400 руб. (табл. 5).

**Таблица 5**

Результаты оптимизации комплекта запасных изделий топливной системы Б-737

| Имя         | Кол-во на ВС | Интенсивность замен | Запасные изделия |      |      |            | Стратегия пополнения | Результаты оптимизации комплекта |           |            |
|-------------|--------------|---------------------|------------------|------|------|------------|----------------------|----------------------------------|-----------|------------|
|             |              |                     | min              | кол. | опт. | цена, руб. |                      | недостат.                        | кол. изд. | цена, руб. |
| MODEL       | **           | *****               | **               | **   | **   | *****      | *****                | 0,0996611                        | 13        | 192400     |
| Кран        | 1            | 0,0021              | 0                | --   | оп   | 19000      | 2 720 24             | 0,0066276                        | 2         | 38000      |
| Панель      | 12           | 0,0019              | 0                | --   | оп   | 6500       | 4 24 1               | 0,0223063                        | 3         | 19500      |
| Насос       | 5            | 0,0017              | 0                | --   | оп   | 43000      | 2 720 24             | 0,0704890                        | 2         | 86000      |
| Выключатель | 3            | 0,0016              | 0                | --   | оп   | 3800       | 4 24 1               | 0,0004096                        | 3         | 11400      |
| Датчик      | 6            | 0,0015              | 0                | --   | оп   | 12500      | 4 24 1               | 0,0022667                        | 3         | 37500      |

Приведенные расчеты позволяют разработать рекомендации для авиакомпании «Трансаэро», направленные на исключение случаев превышения времени стоянки при оперативном ТО по вине отказов изделий топливной системы Б-737 (табл. 6).

**Таблица 6**

Рекомендации по формированию комплекта запасных изделий топливной системы Б-737

| Наименование изделия                                                                | Стратегия пополнения                                                                      | Рекомендации                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Кран кольцевания.<br>2. Топливный насос                                          | Периодическое пополнение с экстренной доставкой                                           | 1. Ежемесячно выполнять плановое восстановление отказавших изделий в условиях «Трансаэро».<br>2. Организовать экстренные доставки работоспособных изделий в течение суток |
| 1. Топливная панель.<br>2. Заправочный выключатель.<br>3. Датчик количества топлива | Непрерывное пополнение в случае использования работоспособных изделий до заданного уровня | 1. Установить для комплекта заданный уровень в количестве 1 изделия.<br>2. Организовать выполнение поставки работоспособных изделий в течение суток                       |

Преимущество рассмотренного метода формирования комплекта запасных изделий с целью обеспечения регулярности вылетов ВС состоит для авиакомпаний в следующем:

- 1) возможность анализировать различные стратегии пополнения и изменять их характеристики с учетом возможностей МТО;
- 2) выявлять оптимальные стратегии пополнения запаса работоспособных изделий для конкретных условий эксплуатации парка ВС;
- 3) минимизировать стоимость приобретения запасных изделий;
- 4) совершенствовать материально-техническое обеспечение оперативного ТО эксплуатируемого парка ВС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чинючин Ю.М., Яковлев А.И., Кирдюшкин В.С. Проблема обеспечения гражданской авиационной техники агрегатами и комплектующими изделиями // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2010. - № 160. - С. 39-43.
2. Ицкович А.А. Управление процессами технической эксплуатации ЛА // Оптимизация комплекта запасных частей: методические указания. - М.: МГТУ ГА, 1997.
3. ДИАНА ЗИП. Руководство для пользователя / разработчики Ушаков И.А., Козлов М.В. и др. - М.: Центр СП «Диалог» в МГТУ, 1991.

#### PECULIARITIES OF FORMATION OF THE COMPLETE SET OF SPARE PARTS TO ENSURE THE REGULARITY OF FLIGHTS OF CIVIL AVIATION AIRCRAFT

Gerasimova E.D., Polyakova I.F., Kirdyushkin V.S.

The method of forming the complete set of spare parts, including optimization according to the criterion of its sufficiency, to ensure the regularity of flights of civil aircraft is dealt with in the article.

**Key words:** regularity of flights, spare parts, replenishment strategy, sufficiency.

#### Сведения об авторах

**Герасимова Евгения Давидовна**, окончила МАИ (1966), кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, автор 57 научных работ, область научных интересов – поддержание эксплуатационной надежности изделий авиационной техники при ТОиР.

**Полякова Инна Федоровна**, окончила МАИ (1969), кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, автор 56 научных работ, область научных интересов – поддержание эксплуатационной надежности изделий авиационной техники при ТОиР.

**Кирдюшкин Владимир Сергеевич**, 1983 г.р., окончил МГТУ ГА (2006), старший инженер отдела 173 ЦАТБ ГосНИИ ГА, автор 25 научных работ, область научных интересов – ресурсное поддержание летной годности воздушных судов.