

УДК 629.7.03

И.Ф. КРАВЧЕНКО, А.В. ЯКОВЕНКО

ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

## МЕТОД РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-КОНСТРУКТОРСКОЙ ЗАДАЧИ ДОВОДКИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ СТЕПЕНИ ДВУХКОНТУРНОСТИ

Приведен метод доводки авиационных газотурбинных двигателей малой степени двухконтурности. В его основе лежат статистические данные и математическая модель доводки двигателя-прототипа, которые позволяют устанавливать связи между достигаемой наработкой, количеством выявленных и устранённых дефектов на двигателе. Темпы выявления и устранения дефектов и их количество дефектов существенным образом зависят от видов и набора специальных испытаний, от качества этапа проектирования двигателя. Показана возможность оптимизации процесса доводки авиационных ГТД с малой степенью двухконтурности ( $m \leq 1$ ), в частности двигателя АИ-222-25 на основании результатов ресурсных испытаний и доводки двигателя-прототипа АИ-25ТЛ.

**Ключевые слова:** двигатель, ЭЦИ, испытания, ресурс, наработка, выявленные и устраненные дефекты.

### Введение

Значительное время и материальные затраты при создании авиационных ГТД занимает этап доводки двигателя, на котором выявляются и устраняются дефекты, препятствующие надёжной работе двигателя на крыле самолета. Эти дефекты могут быть выявлены при проведении целого комплекса специальных работ и проверок двигателя, его длительных и эквивалентно-циклических испытаний.

Темпы доводки двигателя существенным образом зависят от особенностей конструкции двигателя, качества этапов его проектирования и производства, от видов и последовательности проведения испытаний, а также от возможности использования информации в части доводки, сертификации и эксплуатации двигателя.

В [1] на основании статистических данных и закономерностей доводки двухконтурного двигателя Д-36 были выявлены и сформулированы основные закономерности метода, позволяющего оптимизировать процесс доводки применительно к классу двигателей большой степени двухконтурности, в частности, к двигателям Д-136 и Д-18Т.

В основе метода лежат статистические данные по испытаниям и математическая модель доводки, которые позволяют устанавливать связь между наработкой, количеством выявленных и устранённых дефектов на двигателе.

В настоящей работе показана возможность применения подобного метода для оптимизации процесса доводки авиационных ГТД с малой степе-

ню двухконтурности ( $m \leq 1$ ). Этот метод применён для доводки двигателя АИ-222-25 на основании результатов ресурсных испытаний и доводки двигателя-прототипа АИ-25ТЛ.

### 1. Основные результаты ресурсных испытаний и доводки двигателя-прототипа

В свое время для установления ресурса двигателя АИ-25ТЛ были проведены эквивалентно-циклические испытания (ЭЦИ) трёх двигателей №25ТЛ03, №9052523400137 и №9052521700022. Двигатель №25ТЛ03 с 9.04.1971г. по 8.07.1977г. прошёл ЭЦИ за ресурс 3000 часов, а двигатели №9052523400137 и №9052521700022 прошли ЭЦИ за ресурс 5000 часов (соответственно с 15.05.1987г. по 21.01.1988г. и с 22.01.87г. по 20.07. 1988г.).

В результате обработки результатов ЭЦИ двигателей АИ-25ТЛ были построены зависимости между наработкой и выявленными и устранёнными дефектами (рис. 1). Определено понятие оптимальное поле доводки.

Процесс устранения дефектов следовал за процессом их выявления с отставанием не более чем на полгода.

Темп выявления дефектов по наработке был самым высоким за первую треть испытаний (до 2000 часов), когда было выявлено более 50% всех дефектов. График зависимости между наработанным ресурсом и выявленными дефектами представлен на рис. 2.

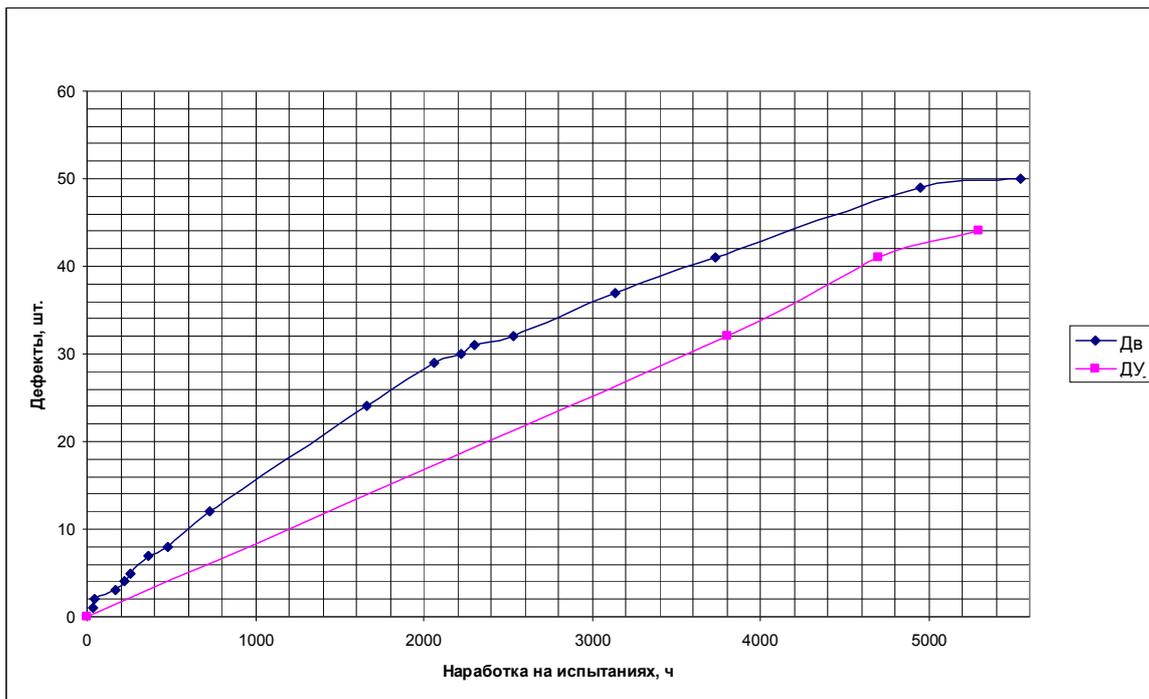


Рис. 1. Зависимость между наработанным количеством выявленными (Дв) и устранёнными (Ду) дефектов двигателя-прототипа АИ-25ТЛ

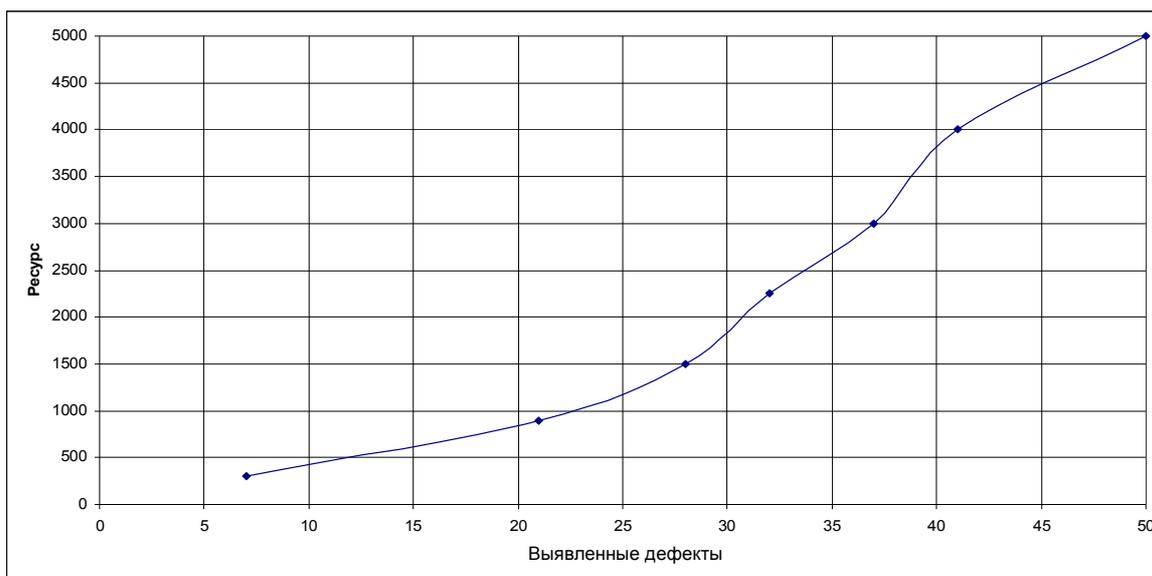


Рис. 2. Зависимость между достигнутым ресурсом и выявленными дефектами двигателя-прототипа АИ-25ТЛ

На рис. 1 и 2 могут быть две фазы доводки. Для второй фазы эти зависимости имеют прилинейный характер (и также как и в [1] для двигателя Д-36) могут быть описаны приближенно следующим образом:

$$D = D_0 + K_d \cdot (T - T_0); \quad (1)$$

$$P = P_0 + K_p \cdot (T - T_0); \quad (2)$$

$$K_c = \frac{P - P_0}{D - D_0} = \frac{K_p}{K_d}, \quad (3)$$

где  $D, T, P$  – текущие значения количества выявленных дефектов, наработки и достигнутого ресурса соответственно;  $D_0, T_0, P_0$  – те же величины, полученные на начало второй фазы доводки;  $K_d, K_p, K_c$  – коэффициенты связи соответственно между приращением количества выявленных дефектов и наработкой, ресурсом и наработкой, дефектами и наработкой.

Исходя из соотношений (1) – (3) были определены следующие коэффициенты связи для второй фазы доводки:

$K_d = 0,01$  дефекта/час наработки;  
 $K_c = 10$  часов наработки/дефект.  
 На рис. 3 и 4 приведены графики показываю-

щие зависимость количества выявленных дефектов от стендовой наработки по годам доводки двигателя АИ-25ТЛ (“пилы” доводки).

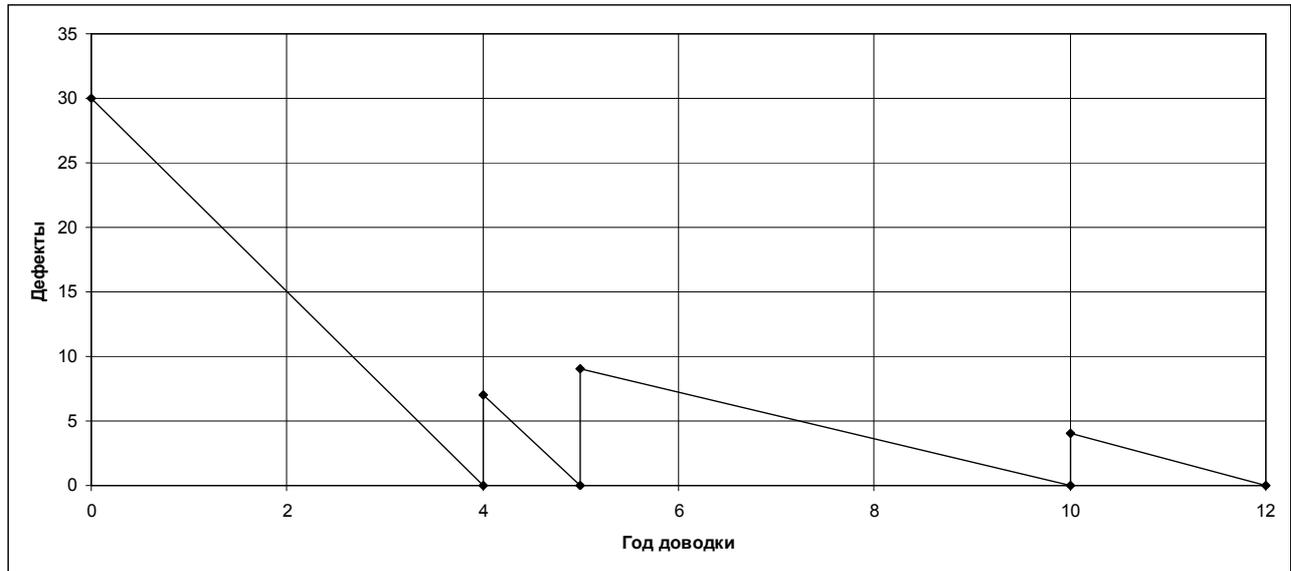


Рис. 3. Зависимость количества выявленных дефектов по годам доводки двигателя-прототипа АИ-25ТЛ

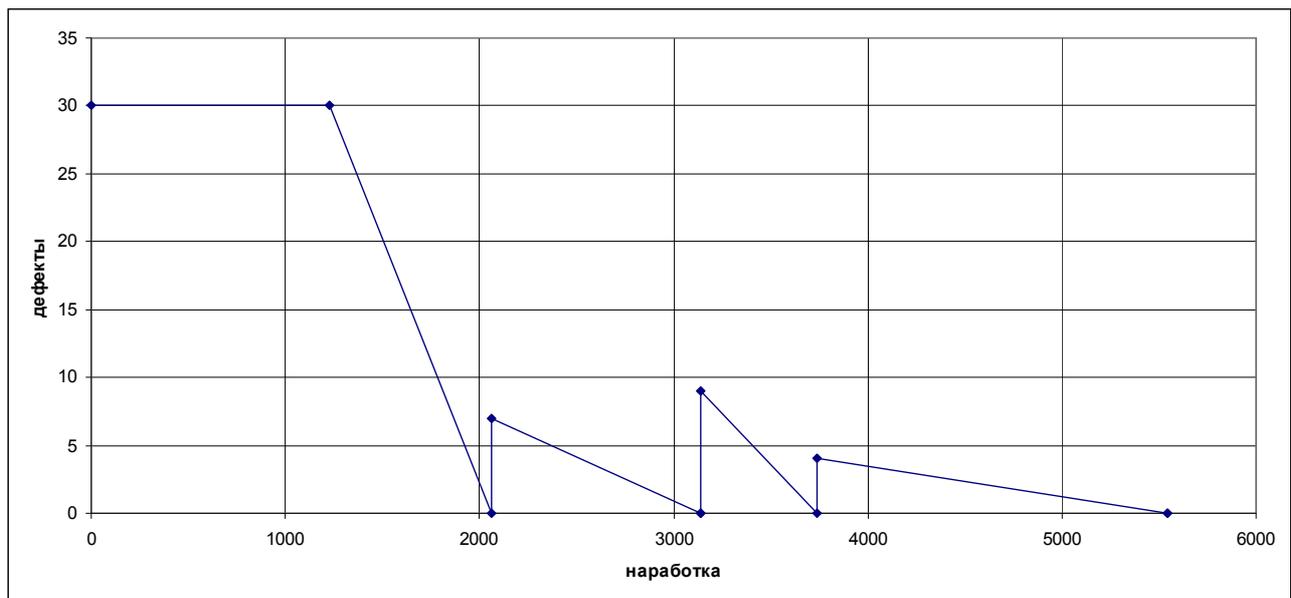


Рис. 4. Зависимость количества выявленных дефектов от стендовой наработки двигателя-прототипа АИ-25ТЛ

Действительное поле доводки для двигателя-прототипа АИ-25ТЛ, построенное по результатам стендовых испытаний двигателей, указанных выше, показано на рис. 5.

Величины углов  $\alpha, \beta$ , ограничивающих поле оптимальной доводки, определяются, с одной стороны, необходимостью снижения количества быстро выявляемых дефектов, а с другой стороны, ограничением величины суммарной стендовой наработки до экономически приемлемых значений.

Как видно из рис. 5, действительное поле доводки двигателя-прототипа АИ-25ТЛ близко к оптимальному полю доводки, характер которого определен для двигателей большой степени двухконтурности в [1].

Некоторое смещение зависимостей количества выявленных дефектов к верхней границе поля доводки, связано с тем, что на первоначальном этапе доводки было выявлено основное количество дефектов двигателя АИ-25ТЛ.

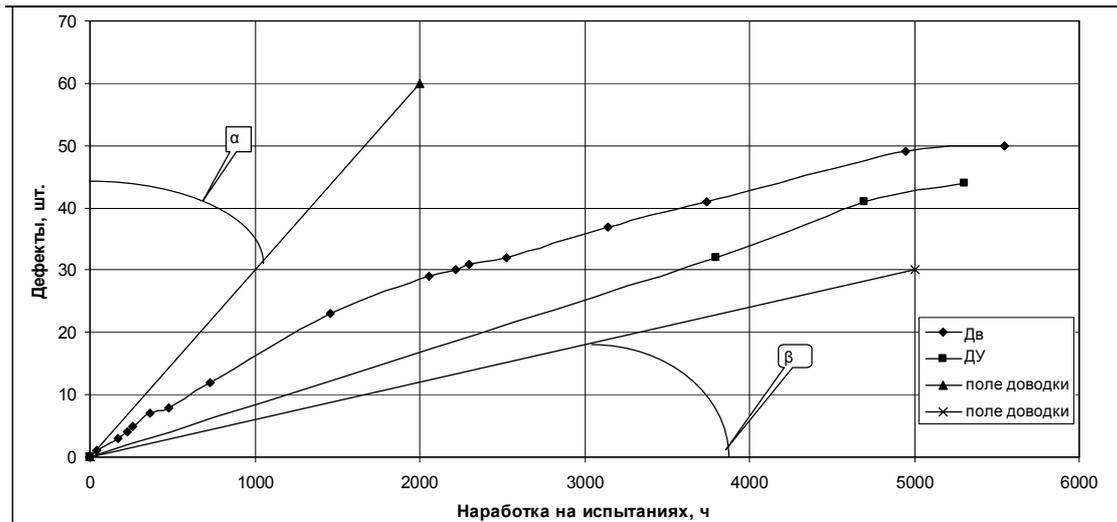


Рис. 5. Поле доводки для двигателя-прототипа АИ-25ТЛ; отрезки прямых под углами  $\alpha, \beta$ , ограничивающими поле оптимальной доводки

## 2. Ресурсные испытания и доводка двигателя АИ-222-25

Для осуществления прогноза доводки нового двигателя – АИ-222-25 до заданного ресурса необходимо знать, с одной стороны, закономерности и эталонное поле доводки эталонного двигателя (АИ-25ТЛ), а с другой стороны – величины коэффициентов относительной конструктивной сложности доводки  $K_{осн}$  и наработки  $K_{тн}$  нового двигателя сравнительно с эталонным. Тогда количество выявляемых дефектов нового двигателя и его наработка до заданного ресурса – произведение количества дефектов, выявленных на прототипе на соответствующий коэффициент –  $K_{осн}$  или  $K_{тн}$ :

$$D_H = D_Э \cdot K_{осн}; \quad (4)$$

$$T_H = T_Э \cdot K_{тн}. \quad (5)$$

Кроме того, необходимо дополнительно определить коэффициенты новизны (отношение суммы

оригинальных и аналогичных деталей нового и эталонного двигателя) и поправки на коэффициент дополнительной технической сложности нового двигателя. В данном случае, дополнительная техническая сложность двигателя АИ-222-25 связана с наличием системы управления двигателем нового поколения. Коэффициент относительной конструктивной сложности доводки  $K_{осн}$  можно представить как произведение ряда подкоэффициентов, один из которых, связанный с наличием системы управления двигателем нового поколения равен 0,116 – отношение количества дефектов, связанных с системой управления, к общему числу выявленных дефектов.

Для установления ресурса двигателя АИ-222-25 были проведены ЭЦИ двух двигателей АИ-222-25 №№ 222003 и 222011 соответственно на ресурс 600 и 1200 часов. В результате обработки результатов указанных ЭЦИ были построены зависимости между наработкой и выявленными и устранёнными дефектами (рис. 6).

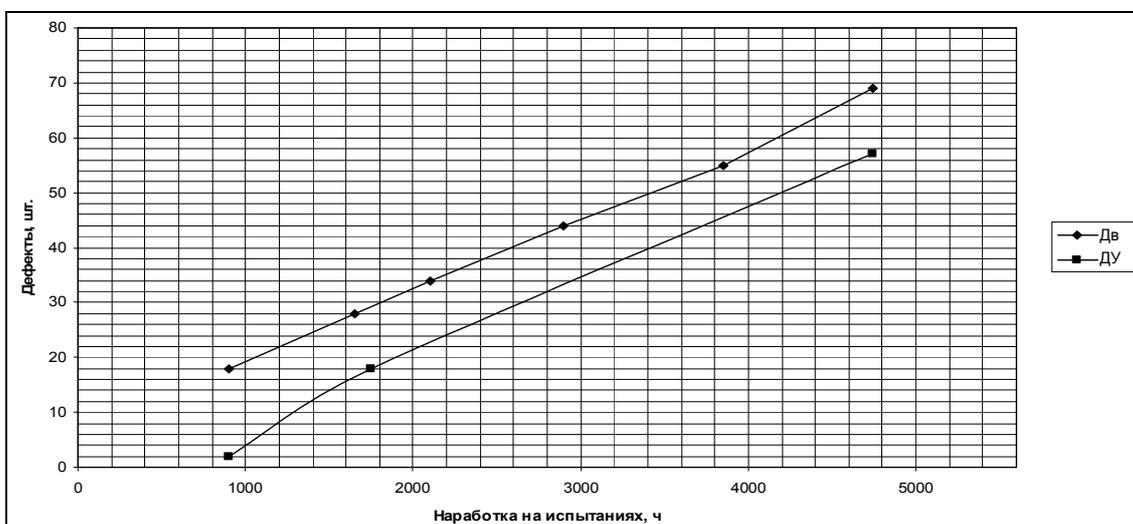


Рис. 6. Зависимость между наработкой и выявленными и устранёнными дефектами двигателя АИ-222-25

Аналогично двигателю-прототипу (АИ-25ТЛ) для АИ-222-25 темп выявления дефектов по наработке был самым высоким за первую треть (до 2000 часов) стендовой наработки, когда было выявлено более 50% всех дефектов.

Зависимость между достигнутым ресурсом и выявленными дефектами представлена на рис. 7.

На рис. 8 и 9 приведены полученные зависимости количества выявленных дефектов от стендовой наработки по годам доводки двигателя АИ-222-25 (“пила доводки”).

Как следует из приведенных рисунков время доводки АИ-222-25 по сравнению с эталонным двигателем (прототипом) уменьшено, что произошло благодаря более качественно проведенному проектированию: за счёт развития расчётно-аналитических методов и накопления опыта разработки двигателей.

График прогнозирования доводки по ожидаемым дефектам и наработке для двигателей АИ-222-25 и АИ-25ТЛ приведен на рис. 10.

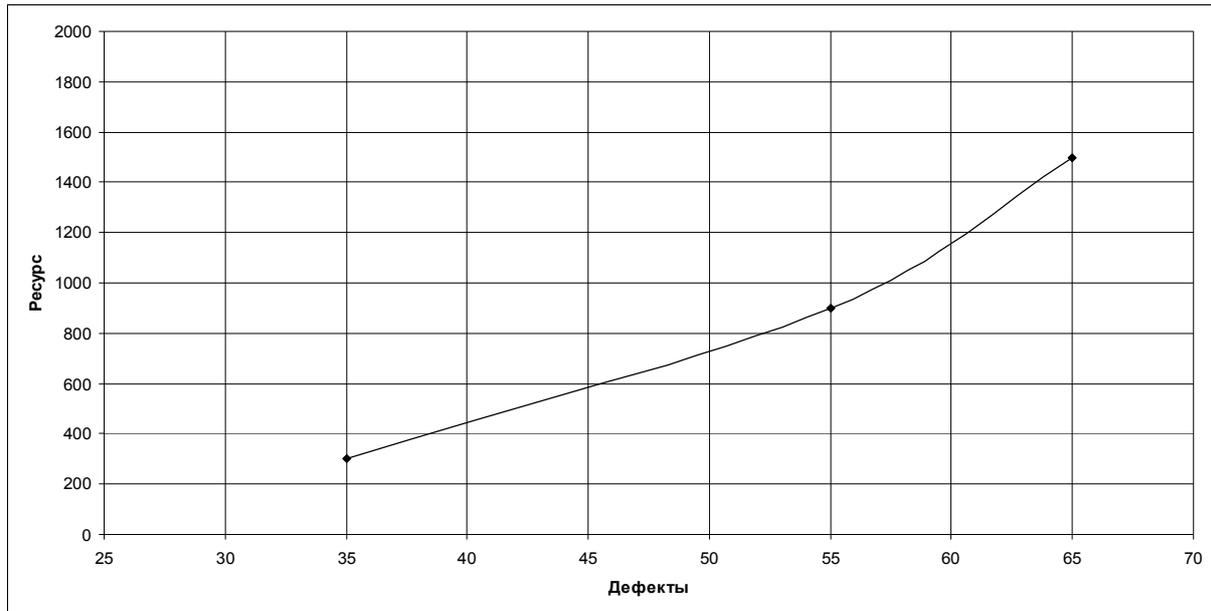


Рис. 7. Зависимость между достигнутым ресурсом и выявленными дефектами двигателя АИ-222-25

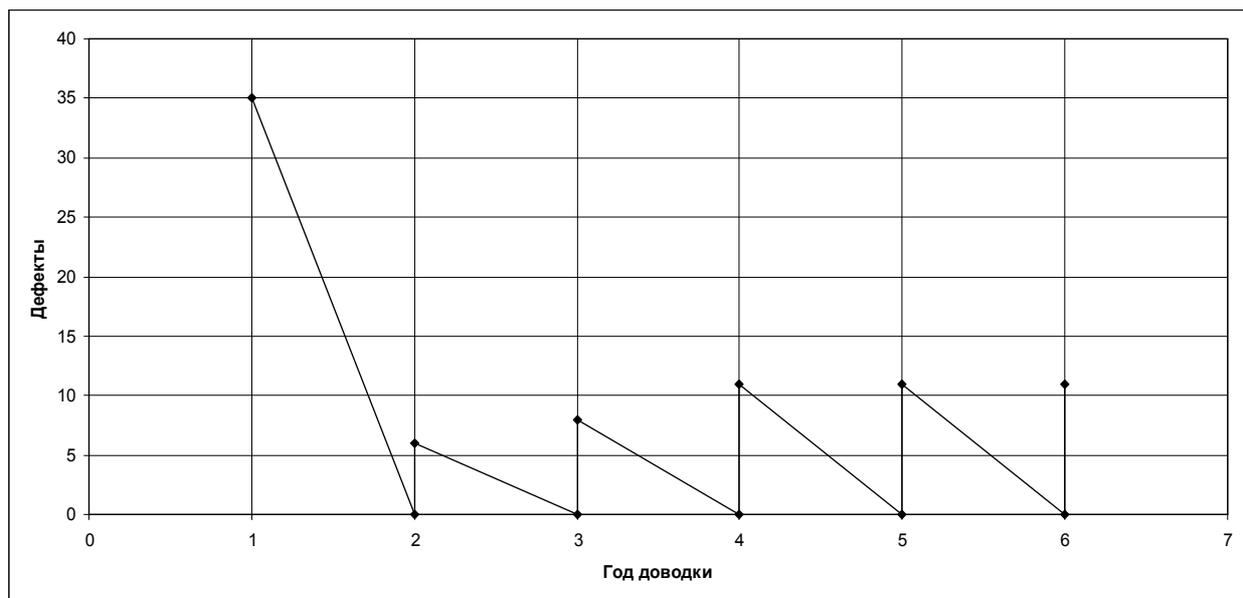


Рис. 8. Зависимость количества выявленных дефектов от стендовой наработки по годам доводки двигателя АИ-222-25

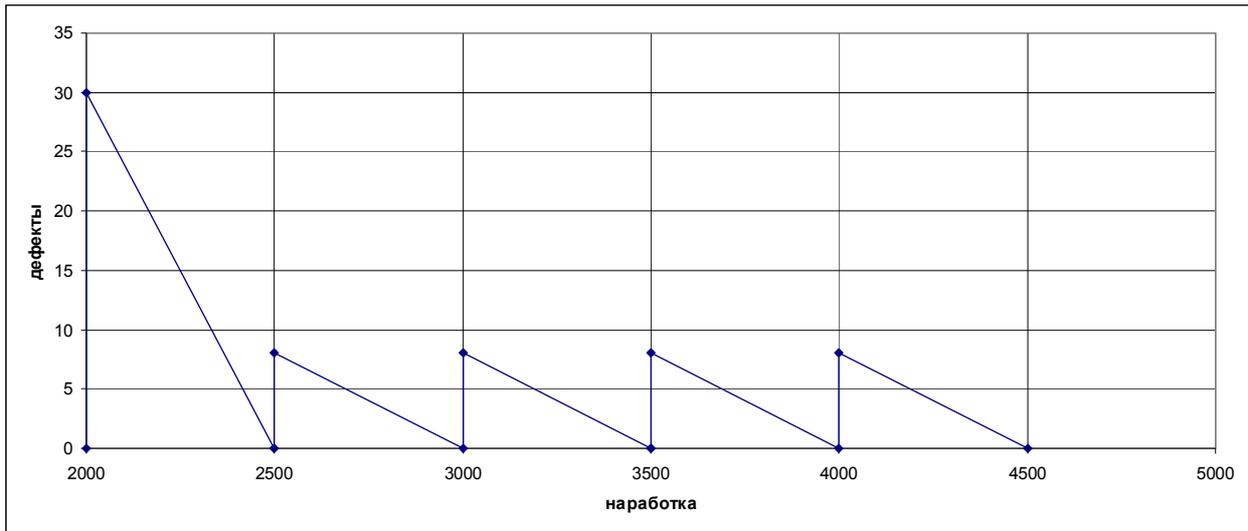


Рис. 9. Зависимость количества выявленных дефектов от стендовой наработки двигателя АИ-222-25

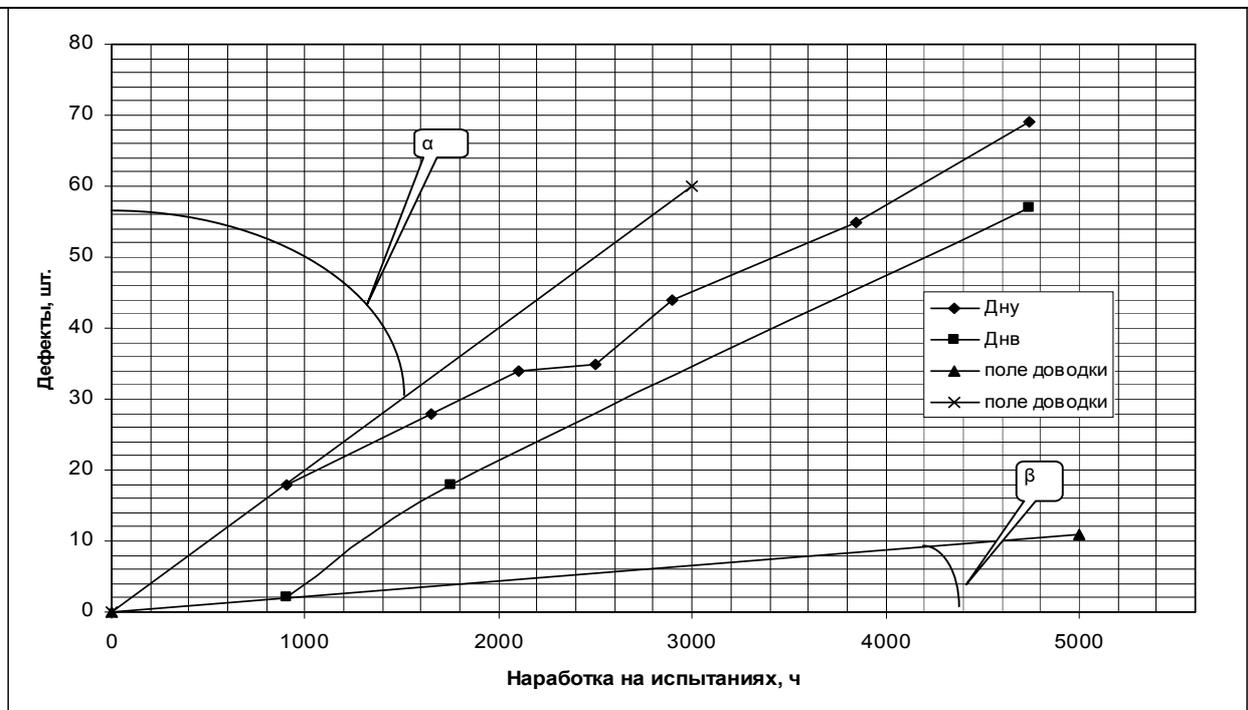


Рис. 10. Действительное поле доводки для АИ-222-25:  $\alpha, \beta$  – углы ограничивающие поле оптимальной доводки

По результатам стендовых испытаний двигателя АИ-222-25 можно сделать следующие выводы:

1) отличия в углах  $\alpha$  и  $\beta$  на рис. 5 и 10 связаны с уменьшением необходимой наработки для достижения заданного ресурса и повышением качества разработки двигателей;

2) если исключить из общего количества выявленных дефектов АИ-222-25 дефекты, связанные со следующими причинами:

– снижение технологической дисциплины в производстве комплектующих и узлов самого двигателя (основная причина установленная в ходе про-

ведения работ по устранению выявленных дефектов; 12 дефектов);

– многочисленность переборок в связи проведением работ на ФГУПП «Салют» и ГП «Ивченко-Прогресс» (8 дефектов);

– наличием системы управления двигателем нового поколения – ЭСУ-222 (10 дефектов), то можно констатировать уменьшение общего количества выявленных дефектов (39 против 50 для АИ-25ТЛ), и, следовательно, увеличение эффективности доводки и разработки двигателя в целом.

## Заключение

В процессе проведенного исследования установлено, что доводка двигателя АИ-222-25 велась в оптимальном поле доводки, определенном по результатам доводки двигателя-прототипа.

Доказано, что предложенная в [1] концепция решения инженерно-конструкторской задачи доводки двигателей большой степени двухконтурности может быть распространена и на двигатель меньшей размерности и степени двухконтурности – АИ-222-25.

Сравнительно с результатами [1] доводка АИ-222-25 показала меньшее количество выявленных дефектов и меньший период доводки, что связано с накоплением опыта разработки двигателей и развити-

ем аналитических методов анализа конструкции, в частности совершенствование метода конечно-элементного расчёта, широко использовавшегося при проектировании АИ-222-25 (снижение числа выявленных дефектов основных деталей по сравнению с АИ-25ТЛ).

## Литература

1. Муравченко, Ф.М. Концепции создания и доводки семейства высокоэффективных ТРДД с большой степенью двухконтурности: дис. в форме научного доклада на соискание ученой степени доктора техн. наук: 05.07.05 [Текст] / Муравченко Федор Михайлович, ХАИ. – Х., 1991. – 56 с.

Поступила в редакцию 30.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

## МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ІНЖЕНЕРНО-КОНСТРУКТОРСЬКОГО ЗАВДАННЯ ДОВЕДЕННЯ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ МАЛОГО СТУПЕНЮ ДВОКОНТУРНОСТІ

*І.Ф. Кравченко, А.В. Яковенко*

Наведено метод доведення авіаційних газотурбінних двигунів малого ступеню двохконтурності. В основу метода покладено статистичні дані та математична модель доведення двигуна-прототипу, яка дозволяє встановлювати зв'язок між досягнутим наробітком, кількістю виявлених та усунених дефектів на двигуні. Темпи виявлення та усунення дефектів та їх кількість значним чином залежать від видів та комплекту спеціальних випробувань, від якості етапу проектування двигуна. Показано можливість оптимізації процесу доведення авіаційних ГТД з малою ступеню двоконтурності ( $m \leq 1$ ), зокрема двигуна АИ-222-25 на базі результатів випробувань та доведення двигуна-прототипу АИ-25ТЛ.

**Ключові слова:** двигун, ЕЦВ, випробування, ресурс, наробіток, виявлені та усунені дефекти.

## METHOD OF SOLUTION ENGINEERING TASK ON LIFE AVIATION ENGINE SMALL SCALE LOW BYPASS RATIO

*I.F. Kravchenko, A.V. Yakovenko*

The state-of-the-art review of experimental researches on life aviation gas turbine engine small scale low bypass ratio. Inherently of method statistical data on test and mathematical model finishing, which allow be setted connection between running hours, amount revealed and debugged defect in engine. Rate revelation and debugged defect (rate finishing engine), amount defects essentially dependent from view and set special test, from quality stage engineering of engine. Demonstration capability application method, permitting optimize process on life aviation gas turbine engine small scale low bypass ratio ( $m \leq 1$ ). This method application for debugging engine АИ-222-25 on the ground result life test and debugging engine- prototype АИ-25ТЛ/

**Key words:** engine, ECT, test, life, running hours, expose and eliminate defects.

**Кравченко Игорь Федорович** – канд. техн. наук, доцент, Генеральный конструктор ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

**Яковенко Андрей Владимирович** – инженер-конструктор, ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.