

УДК 629.7

МЕТОДИКА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТРУБОПРОВОДОВ ГИДРОСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Р.Г. ТИМИРКЕЕВ, А.А. ИЦКОВИЧ

Приведены результаты исследований по разработке методики выбора режимов нагружения для ускоренных испытаний трубопроводов гидросистем на долговечность с учетом нулевых результатов нагрузок, обеспечивающих адекватность реальным процессам появления усталостных трещин и разрушения материала.

Ключевые слова: летательные аппараты, трубопроводы гидросистем, долговечность, ускоренные испытания, выбор режимов нагружения, методика, пульсирующий поток, циклическая усталость, теория Вейлера трещиностойкость, скорость деформации, скорость нагружения, предел текучести, число циклов нагружения, плазменный метод контроля герметичности.

Разработана методика выбора нагрузок для ускоренных испытаний трубопроводов гидросистем с учетом нулевых результатов нагрузок, обеспечивающих адекватность реальным процессам появления усталостных трещин и разрушения материала.

В настоящее время испытания на долговечность стальных или гибких гофрированных или фторопластовых трубопроводов проводятся на вибростендах. Однако более информативными являются испытания с учетом реальных условий работы трубопроводов, характеризующихся наличием пульсирующего потока рабочей жидкости.

Для обоих указанных методов испытаний актуальным является проведение в ускоренных режимах, но обеспечивающих адекватность физических процессов разрушения материала трубопроводов [3].

Существующая практика применения методов ускоренных испытаний при циклических нагружениях изделий авиатехники из стальных материалов основана на увеличении силовой нагрузки или частоты, исходя из характеристик существующего оборудования. Считается, что при таких произвольно назначенных нагрузках соблюдаются идентичность физического механизма разрушений в обоих случаях.

Однако на практике частота испытаний выбирается в узком диапазоне реальных условий (10 Гц – при пробеге самолетов и 200 Гц, которые генерируются двигателями в полете), т.е. надо более обоснованно назначать только силовые нагрузки.

Хотя на практике в указанных случаях достигается сокращение циклических испытаний, однако такой подход не всегда гарантирует идентичность механизма разрушений в сравнении со стандартными испытаниями материалов по оценке их прочностных характеристик. Также нет методики выбора величин нагружения и главное нет ожидаемого, прогнозируемого числа циклов до разрушения.

Поэтому главной задачей данной методики является прогнозирование числа циклов при определенных нагрузках, адаптированных к методам ГОСТ(ов) нахождения прочностных свойств материалов.

Основная задача данной работы – оптимизация этих нагрузок с целями определения закономерного сокращения прогнозируемого числа циклов и вероятности разрушения материала при выбранных режимах циклических нагружений.

Предлагаемая методика базируется на классической теории Вейлера, основанная на диаграмме циклической усталости в координатах: число циклов $n \rightarrow N_0$ - амплитуда напряжений σ_α . Как известно, эта диаграмма состоит из круто ниспадающей и пологих ветвей, точка пересечения которых определяет значение σ_{-1} . – предел усталости на базе $N_0 = 10^6 \dots 10^9$ циклов [1; 2].

Нами проведена аппроксимация крутой ниспадающей ветви в виде уравнения, когда $\sigma_\alpha > \sigma_{-1}$.

$$\ln n = \left[\left\{ \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_\alpha} \right\} \right]^{4,5} \ln N_0. \quad (1)$$

Для пологой ветви диаграммы, когда $\sigma_{-1} > \sigma_\alpha$, получаем

$$\ln n = \left\{ \sqrt[3]{\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_\alpha} \right)^2} \right\} \ln N_0. \quad (2)$$

Расчетные графики по формулам (1) и (2) для удобства интерпретации результатов приведены в относительных единицах $\sigma_\alpha > \sigma_{-1}$ (рис. 1) напряжения (оно же далее и относительная деформация).

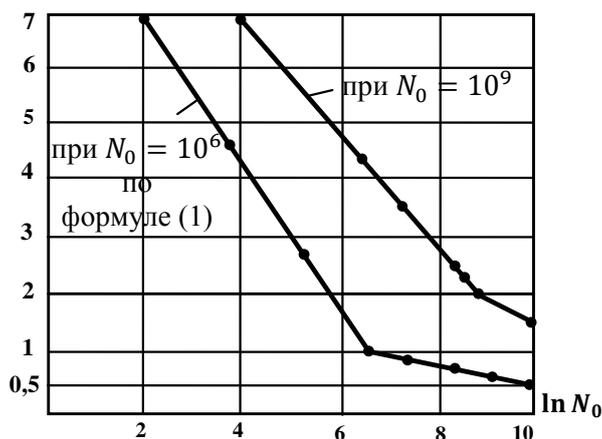


Рис. 1. Расчетные диаграммы циклических испытаний

Анализ графиков показывает, что при отношении $\sigma_\alpha/\sigma_{-1}$ порядка 4...5 при любых базовых значениях число циклов N_0 сокращается в 600-1000 раз соответственно.

Наиболее частый дефект – появление негерметичности в виде капель жидкости или запотевания из-за возникновения сквозных пор и трещин на стальных трубопроводах.

По современным данным появление субмикронных, затем микро-, далее коротких и, наконец, макротрещин наблюдается чаще всего при значениях $\sigma_\alpha/\sigma_{-1} \geq 1,5$ или $\sigma_\alpha/\sigma_{-1} \geq 2,5$ для стабильных или разупрочняющихся стальных материалов соответственно.

Число циклов до постоянно деградирующих трещин для большинства твердых материалов составляет $n = 10^2 \dots 10^3$ циклов и $n = 10^4 \dots 10^5$ циклов соответственно, что входит в найденный предел (диапазон) ускоренных испытаний.

Таким образом, дальнейшее увеличение нагрузки в целях сокращения длительности испытаний теоретически будет неоправданным (нет зоны проявления трещин).

Следовательно, при найденных параметрах методики сокращения испытаний обязательно постоянно контролировать герметичность самыми чувствительными методами течеискания (галогенный, масс-спектроскопический или новый – плазменный).

Второй важной задачей для получения научно-обоснованных и достоверных результатов является оценка вероятности $B_{разр}$ разрушения при рассчитанных значениях циклов.

Очевидно, что вероятность $B_{разр}$ представляет собой вероятность события, когда относительные удлинения (деформации) или ответственные за них действующие напряжения, эквивалентные отношению $\sigma_\alpha/\sigma_{-1}$, превысят предел σ_σ/E , где σ_σ - предел прочности при растяжении, E - модуль упругости. Введем разностный параметр предельного состояния испытуемой продукции в виде

$$B_{разр} \left(\frac{\sigma_\alpha}{\sigma_{-1}} - \frac{\sigma_\sigma}{E} \right) \geq \tilde{y} > 0, \quad (3)$$

где \tilde{y} - случайная величина, подчиняющаяся нормальному закону вероятности Лапласа-Гаусса.

Это справедливо, когда нет превалирующих факторов, а здесь факторов более 20-ти (кроме использованных характеристик твердых тел, на деформацию влияют величины трещиностойкости, скорость деформаций, скорость нагружения, предел текучести и т.д.).

Известно, что со временем, пластичные стальные материалы приобретают свойства хрупких, т.е. имеют вероятностный характер.

Таким образом, предложенная формула (3) имеет право на существование, тогда введенный разностный параметр \tilde{y} подчиняется нормированному нормальному закону Лапласа-Гаусса как ошибка при любых измерениях в виде

$$B_{разр} = \Phi(Z), \quad (4)$$

где $Z_\alpha = \frac{\sigma_\alpha/\sigma_{-1} - \sigma_\sigma/E}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}$ - квантиль нормального закона дисперсии разностных параметров.

Здесь α - надежность, назначаемая из условий ответственности трубопровода; S_1 и S_2 - среднеквадратичные отклонения параметров $\sigma_\alpha/\sigma_{-1}$ и σ_σ/E соответственно.

В условиях опытных данных и ограниченной выборки часто используют правило математической статистики, когда среднеквадратические отклонения S_1^2 и S_2^2 выбираются равными 0,25 от математических ожиданий параметров $\sigma_\alpha/\sigma_{-1}$ и σ_σ/E .

Результаты расчетов $B_{разр}$ при $\sigma_\sigma/E \approx 0,2$ даны на рис. 2 (зависимость 1).

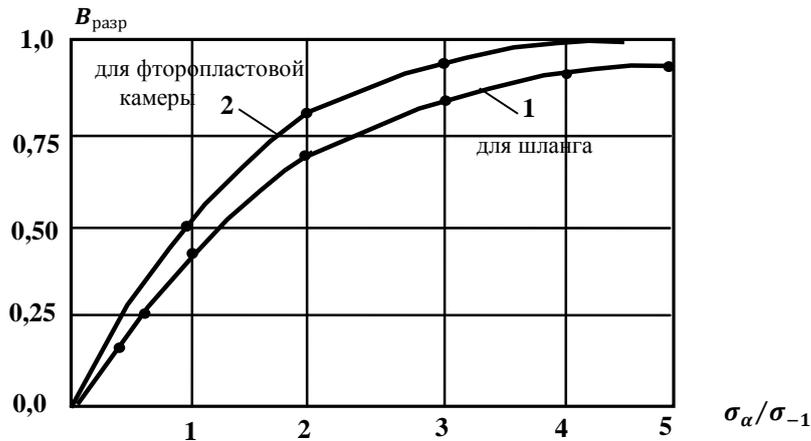


Рис. 2. Зависимость $B_{ср}$ (разрушения) от матожидания параметра $\sigma_\alpha/\sigma_{-1}$ при $\sigma_\sigma/E \approx 0,2$ (зависимость 1) для стальных трубопроводов и при $\sigma_\sigma/E = 0,3$ (зависимость 2) для алюминиевых трубопроводов

Так как значения E для алюминиевых трубопроводов значительно меньше, чем для стальных, зависимость 2 на рис. 2 рассчитана при $\sigma_\sigma/E = 0,3$.

Из графиков следует, что при выбранном отношении $\sigma_\alpha/\sigma_{-1} \approx 4 - 5$ значение $B_{разр} \approx 0,8 - 0,9$, т.е. достаточно велико.

Контроль этого значения по опытным данным будет свидетельствовать о правомерности предложенных параметров ускоренных испытаний, так как формулы (3) и (4) справедливы только в момент разрушения материала при числе найденных циклов по формуле (1).

На рис. 3 приведена блок-схема гидродинамического стенда для ускоренных испытаний. Дроссельный генератор пульсаций, выполненный в виде двух дисковых профилированных зо-

лотников, имеет привод от небольшого, массой в 1,6 кг, электромеханического редуктора. Заданное напряжение тока обеспечивает частоту пульсаций в пределах 20...50 кГц, а краны 11 обеспечивают амплитуды пульсаций в пределах 0,35 – 0,7 от величины рабочего давления в зависимости от выбора диаметров слива после указанных кранов.

Таким образом, стенд позволяет в 1 – 4 раза увеличивать амплитуды пульсаций в сравнении с рабочими пульсациями в реальной гидросистеме, что реализует метод ускоренных испытаний.

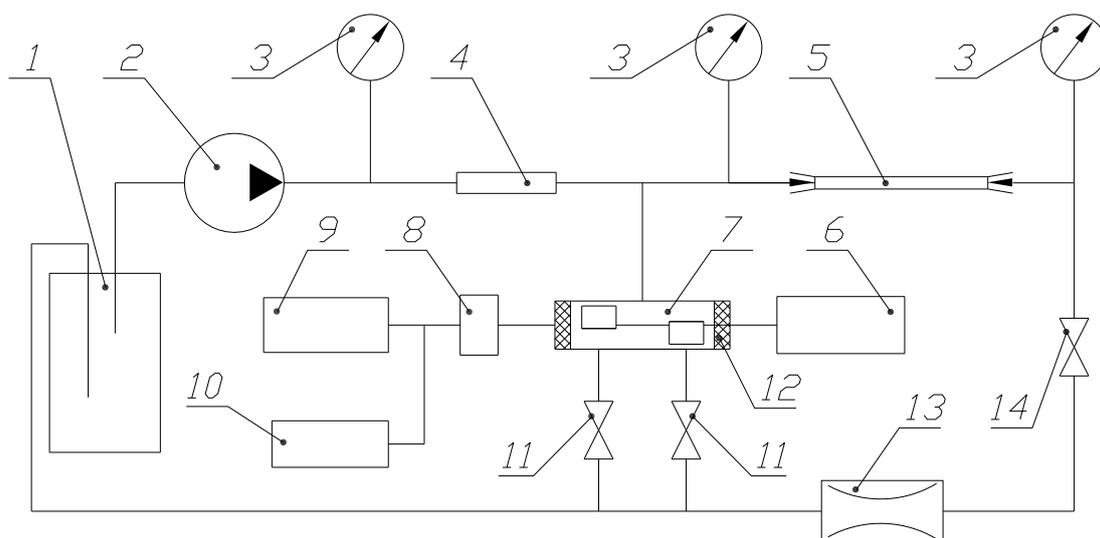


Рис. 3. Блок-схема стенда для ускоренных испытаний:

1 – гидробак; 2 – гидронасос; 3 – манометр; 4 – капиллярный дроссель; 5 – испытуемый трубопровод; 6 – электромеханический редуктор ЭМР-10А; 7 – дроссельный генератор пульсаций; 8 – датчик давления; 9 – осциллограф; 10 – счетчик пульсаций; 11 – кран выбора и настройка амплитуды пульсаций; 12 – резиновые уплотнения; 13 – гаситель пульсаций; 14 – вентиль нагрузочный

Выводы

1. Обоснована относительная величина нагрузки $\sigma_\alpha/\sigma_{-1} \approx 4 - 5$ в относительных единицах.
2. При выбранных напряжениях циклических испытаний число циклов сокращается в 600 – 1000 раз в сравнении с базовым числом циклов $N_o = 10^6$ или $N_o = 10^9$.
3. Данная методика однозначно соответствует методам РТМ и ГОСТ на усталостные испытания.
4. Вероятность разрушения при указанных параметрах достаточно велика $V_{\text{разр}} \approx 0,8 - 0,9$.
5. Число циклов при появлении трещин $n = 10^3 - 10^4$ и силовые нагрузки находятся в диапазоне предлагаемой методики ускоренных испытаний, т.е. меньшее число циклов испытаний не целесообразно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер И.А. Прочность и надежность машиностроительных конструкций. Избранные труды. М.: Машиностроение, 1977. № 17.
2. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 702 с.

3. Ицкович А.А. Надежность летательных аппаратов и авиадвигателей: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 1995, 92 с. Ч. 2.

TECHNIQUE OF THE ACCELERATED TESTS FOR DURABILITY OF AIRCRAFT HYDRAULIC SYSTEMS PIPELINES

Timirkeev R.G., Itskovich A.A.

The articles provides the results of the research on the development of the load condition mode selection for accelerated testing of the hydraulic system pipelines durability, taking into account the results of zero loading technique providing the adequacy to the actual process of leading to fatigue cracks and material destruction.

Keywords: aircraft, hydraulic systems of pipelines, durability, accelerated testing, the choice of modes of loading technique, pulsating flow, cyclic fatigue, Weiler theory, fracture resistance, strain rate, loading rate, the yield strength, the number of loading cycles, plasma control method of tightness.

REFERENCES

1. Birger I.A. *Prochnost' i nadezhnost' mashinostroitel'nykh konstrukciy. Izbrannye Trudy.* М.: Mashinostroenie, 1977. № 17. (In Russian).
2. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost' detaley mashin.* М.: Mashinostroenie, 1979. 702 p. (In Russian).
3. Itskovich A.A. *Nadezhnost' letatel'nykh apparatov i aviadvigatelay: ucheb. posobie.* М.: MGTU GA, 1995. С. 2. 92 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Тимиркеев Ренат Гарифович, 1937 г.р., окончил УАИ (1959), профессор, доктор технических наук, советник генерального директора ОАО «НИАТ», автор более 100 научных работ, область научных интересов - технология сборки и надежность гидротопливных систем летательных аппаратов, эксплуатация и поддержание летной годности воздушных судов.

Ицкович Александр Абрамович, 1934 г.р., окончил УАИ (1957), профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей МГТУ ГА, автор более 280 научных работ, область научных интересов - эксплуатационная надежность и эффективность эксплуатации авиационной техники, управление процессами поддержания летной годности летательных аппаратов, интегрированная логистическая поддержка.