

«В сборник трудов НПО Энергомаш №35»

Главный редактор

_____ В.К. Чванов

« ____ » _____ 2018 г.

АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В МАГИСТРАЛЯХ ПОДАЧИ ГОРЮЧЕГО ЖРД

В.Н. Журавлёв, канд. техн. наук В.В. Ткач

Проведен анализ повышенных высокочастотных пульсаций давления в трубопроводе за насосом горючего второй ступени двигателей РД180 и РД191.

Выполнен сравнительный анализ эффективности различных способов снижения пульсаций с использованием одномерной математической модели потока упруго мало-сжимаемой жидкости.

Ключевые слова: акустические моды колебаний; многорежимный ЖРД; отстройка частот; пучность волны.

Введение

Особенностью работы многорежимного ЖРД является его повышенная динамическая активность на определенных режимах из-за совпадения собственных частот акустических мод колебаний газовых и жидкостных объёмов, а также собственных частот механических колебаний элементов конструкции с частотами внутренних и внешних возмущающих процессов. К внутренним процессам относятся вибрации от дисбаланса рото-

ров, пульсации давления и расхода газовых и жидкостных сред на выходе из насосов и турбин, крутильные колебания роторов, колебания подвижных элементов клапанов и регуляторов и т.п. К внешним источникам возмущений относятся колебания корпуса ракеты, пульсации давления и расхода компонентов топлива на входе в двигатель.

Продолжительная работа двигателя на динамически активных режимах ведет к снижению его надежности и ресурса. Поэтому на этапе проектирования двигателя осуществляется подбор числа лопаток насосов, сопловых аппаратов и турбин, а также длин трубопроводов и газопроводов с целью исключения совпадений собственных частот акустических мод колебаний с лопаточными частотами насосов и турбин на основных стационарных режимах работы двигателя.

При проектировании двигателя РД191 расчётный анализ по «отстройке частот» был проведен для стационарных режимов стендовых и лётных испытаний двигателя в составе РН «Ангара». Но циклограммы лётных испытаний двигателя в составе РН «Antares» были дополнены стационарными режимами в диапазоне тяг 80-90%, на которых проявляются повышенные пульсации давления в трубопроводе между второй ступенью насоса горючего (НГ2) и регулятором расхода, на частотах, кратных 7-ой роторной ТНА (первая лопаточная частота насоса горючего второй ступени по количеству основных лопаток). В статистике стендовых ОИ двигателя отмеченные пульсации достигают уровня 27 атм (эффективное значение) в спектре соответствующего динамического параметра на частоте 2350 ± 50 Гц. Похожее явление в аналогичном трубопроводе наблюдается при ОИ двигателя РД180 в диапазоне тяг 75-85%, рис. 1. В обоих случаях

спектральная составляющая на первой лопаточной частоте занимает практически весь суммарный сигнал динамического параметра, рис. 2.

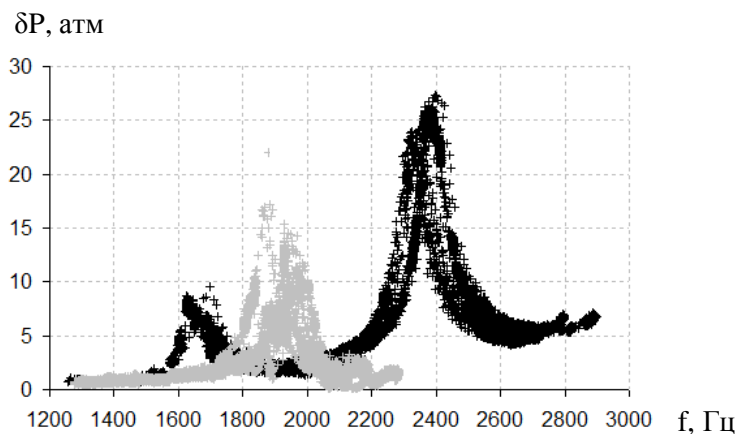
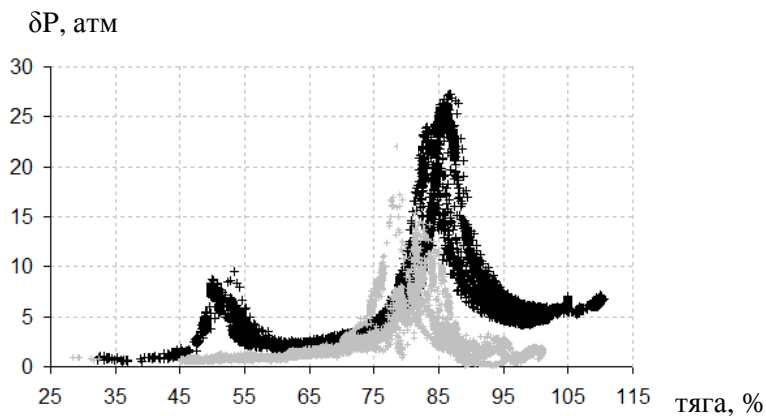


Рис. 1. Амплитуды пульсаций давления после НГ2 на первой лопаточной частоте:

■ - двигатель РД180, ■ - двигатель РД191

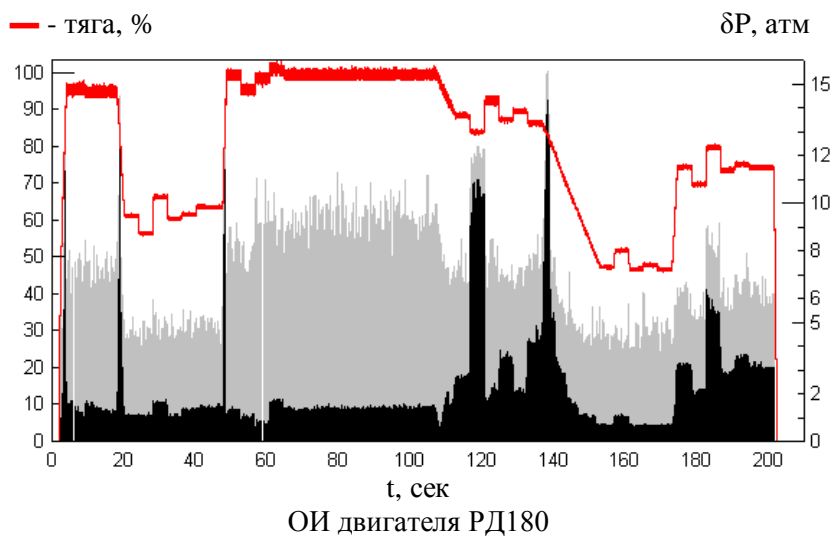
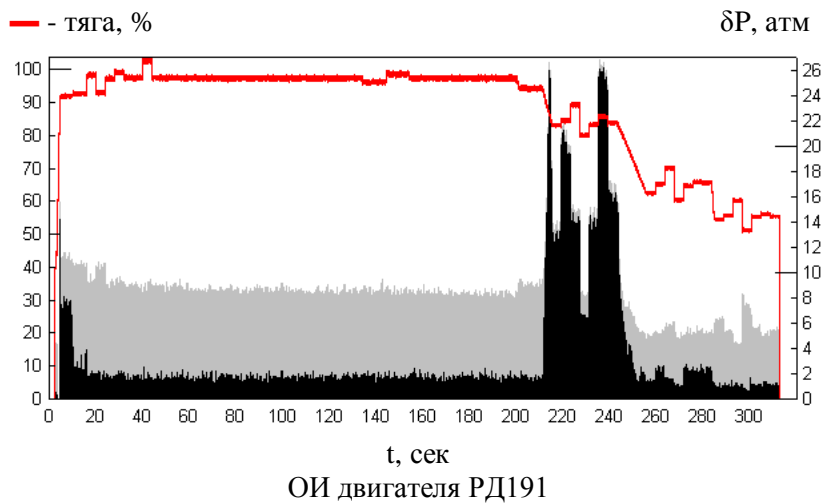


Рис. 2. Амплитуды пульсаций давления после второй ступени
НГ:
■ - на первой лопаточной частоте; ■ - суммарный сигнал.

Оценка частот акустических мод колебаний жидкости в рассматриваемом трубопроводе двигателя РД191 для режима работы 85% (температура керосина +54⁰С, давление 670 атм., расход 7,7 кгс/с), по аналитической зависимости [1]:

$$F_i = i \cdot \frac{1}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

где: L=1.2м - длина трубопровода, B=1898МПа - модуль упругости керосина, $\rho=0.85\text{г/см}^3$ - плотность керосина, $i=1, 2, 3 \dots$, показала, что частота пульсаций давления жидкости с максимальными амплитудами совпадает с 4-ой (2350Гц) акустической полуволновой модой, что соответствует акустически закрытым граничным условиям с нулевым колебательным расходом на концах трубопровода.

Двигатель для РН «Antares» успешно прошёл многократные испытания, включающие диапазон тяг 80-90% и показал достаточные запасы прочности и ресурс, всё же, с целью снижения рисков уровень тяги 85% был исключён заказчиком из лётной циклограммы двигателя. Для снятия этого ограничения проведен более подробный анализ акустических мод колебаний упругой жидкости в трубопроводе и разработаны мероприятия, направленные на снижение пульсаций на исключённом уровне тяги.

Математическая модель потока упруго малосжимаемой жидкости в трубопроводе

Схема исследуемого участка трубопровода представлена на рис. 3. Расчёты выполнены в программном комплексе LMS Im-

agine.Lab Amesim (SIEMENS). Математическая модель - одномерная с распределёнными параметрами, описывает функционально НГ2 и регулятор расхода (РР). Модель представлена дискретными динамическими элементами, описывающими инерционные, ёмкостные и резистивные характеристики жидкости и включает в себя участок конического патрубка НГ2, трубопровод диаметром 24мм и проточную часть РР, рис. 3 поз. а. Суммарная длина расчётного участка трубопровода составила $L=1.2\text{м}$. Используемые характеристики керосина были приведены выше.

Адекватность модели подтверждена путём верификации расчетных значений частот и фаз акустических колебаний жидкости в точках измерения пульсаций после НГ2 и после РР, рис.3 поз. 1-5.

Расчётный анализ эффективности способов демпфирования колебаний

Как показали расчеты усиление пульсаций происходит из-за совпадения частоты четвёртой акустической моды с первой лопаточной частотой НГ2 (т.е. резонанс). Так как данная акустическая мода состоит из двух волн, рис. 3 поз. 4, то длина волны равна половине длине трубопровода, $\lambda_c=L/2=0,6\text{м}$.

Как известно, наиболее эффективно рассеяние энергии колебаний происходит на сопротивлении, установленном в первой по потоку пучности волны расхода, что соответствует нулю волны давления (узлу давления). Для четвертой акустической моды пучность волны расхода расположена на расстоянии $l=L/4=0,15\text{м}$ от входа в конический патрубок НГ2, рис. 3 поз. б.

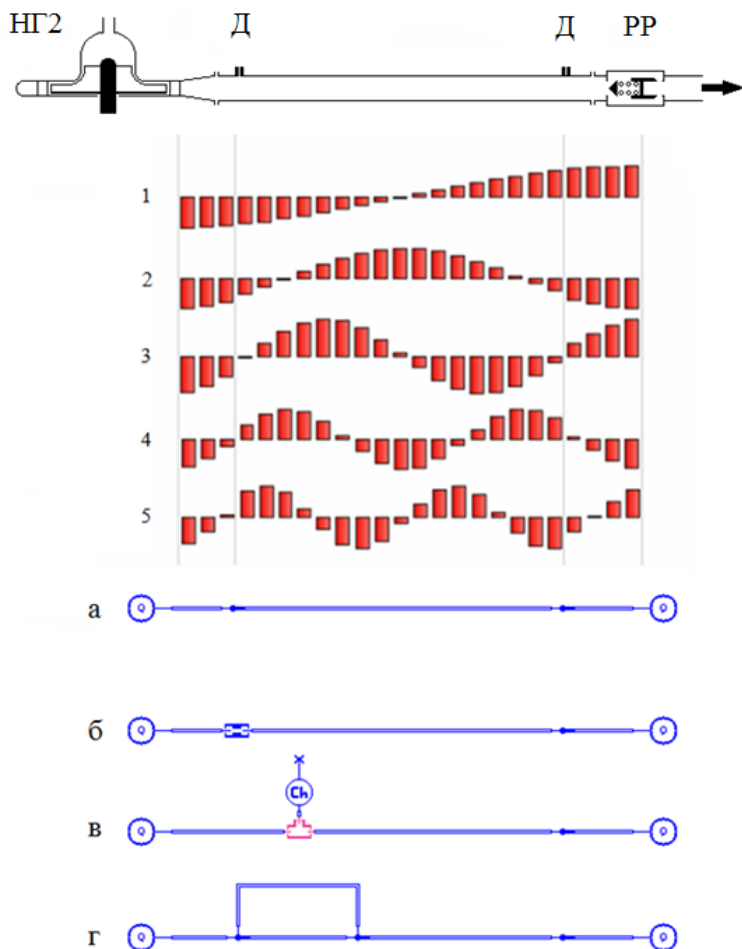


Рис. 3. Схема и математические модели, поз.: 1-5 первые акустические моды колебаний по давлению; а - штатный трубопровод; б - трубопровод с жиклёром; в - трубопровод с демпфером; г - трубопровод с байпасом; Д - датчики пульсаций давления.

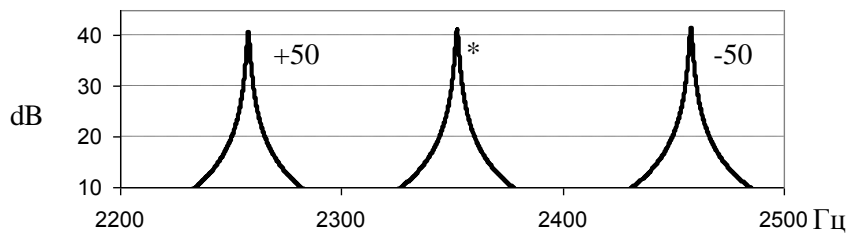
Расчётом определено, что установка сопротивления длиной 5мм и диаметрами проходного отверстия 22, 20 и 18мм позволяет снизить пульсации в 1,7, 3,3 и 6,5 раз соответственно. На рис. 4, б представлен спектр отклика в dB (децибеллы), изображающий соотношение между амплитудой расхода Q после НГ2 и амплитудой давления P перед РР на частоте четвёртой акустической моды. Абсолютные значения амплитуд можно определить из соотношения:

$$20 \log_{10} \frac{P}{Q} = \text{dB}$$

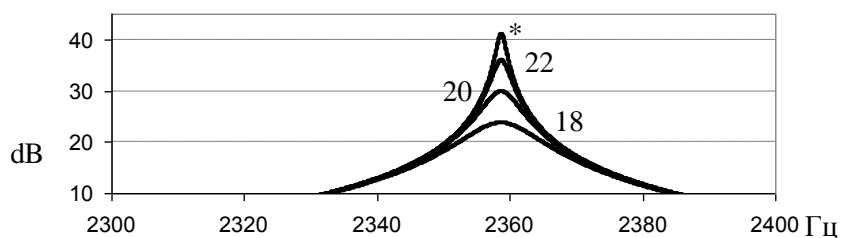
Установка демпфера в пучности давления, т.е. на расстоянии 0.3м от входа в конический патрубок насоса, рис. 3 поз. в, позволяет снизить пульсации в 1,4, 1,8 и 2,6 раза при диаметре горла демпфера 1, 2 и 4мм соответственно, рис. 4, в. При этом длина горла демпфера принимается равной толщине стенки трубопровода, т.е. 2мм, а объем демпфера V вычисляется в первом приближении из:

$$f_p = \frac{C}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{отв}}}{L_{\text{отв}} \cdot V}}$$

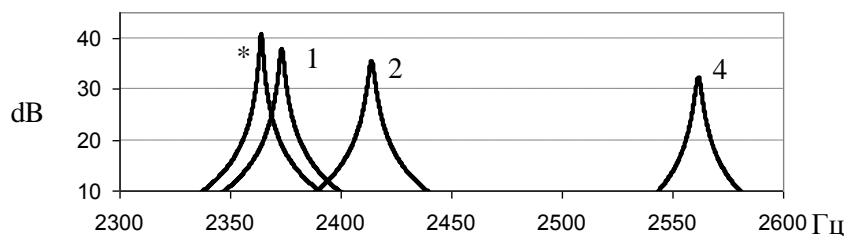
где: $f_p=2350\text{Гц}$ - резонансная частота демпфера; $S_{\text{отв}}$ - площадь горла демпфера; $L_{\text{отв}}=2\text{мм}$ - длина горла демпфера; $C=1494\text{м/с}$ - скорость звука в керосине на расчетном режиме. При этих характеристиках объем демпфера составит 295см^3 , что достаточно много. Еще одним способом рассеяния энергии колебаний является установка трубопровода перепуска (байпаса) с точками разветвления в пучности волны расхода, рис. 3 поз. г. Место разветвления расположено на расстоянии 0,15м от входа в кони-



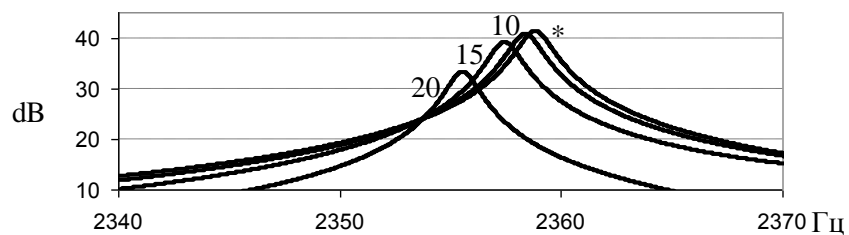
а) изменение длины трубопровода, мм



б) диаметр жиклёра, мм



в) диаметр горла демпфера, мм



г) диаметр байпаса, мм

Рис. 4. Частотный отклик амплитуды давления (P) к амплитуде расхода (Q), * - штатный вариант конструкции.

ческий патрубок насоса. Длина основного трубопровода от входа до выхода разветвления выбирается так, чтобы волны расхода на выходе из перепуска и из основного трубопровода были в противофазе. Тогда длина основного трубопровода должна быть кратна половине длины волны расхода, т.е. 0,3м, а длина трубопровода перепуска должна быть кратна длине волны, т.е. 0,6м. В этом случае пульсации давления снижаются в 1,06, 1,3 и 2,5 раза при диаметре трубопровода перепуска 10, 15 и 20мм соответственно, рис. 4, г.

В случае изменения длины трубопровода происходит смещение частот акустических мод колебаний на другие уровни тяг двигателя, при этом амплитуды колебаний практически не меняются, рис. 4, а.

Для проведения сравнительного анализа рассмотренных способов демпфирования колебаний результаты расчётов сведены в общую таблицу. Такую же эффективность они будут иметь при использовании на аналогичном трубопроводе двигателя РД180.

Наиболее простым способом, с точки зрения конструктивного исполнения, является установка жиклёра. Показано, что жиклёр диаметром 20мм снижает амплитуду пульсации в 3,3 раза, при этом перепад давления составляет 0,9атм.

Влияние способа демпфирования на амплитуду пульсаций

Изменение длины трубопровода, ΔL			
ΔL, мм	-50		+50
Изменение частоты, Гц	+100		-100
Коэффициент усиления	0,94		1,06
Диаметр жиклёра, D _ж			
D _ж , мм	22	20	18
Перепад давления, атм	0,3	0,9	2,1
Коэффициент усиления	0,59	0,3	0,15
Диаметр горла демпфера, D _д			
D _д , мм	1	2	4
Изменение частоты, Гц	+10	+50	+200
Коэффициент усиления	0,7	0,56	0,38
Диаметр байпаса, D _б			
D _б , мм	10	15	20
Изменение частоты, Гц	0	-1	-3
Коэффициент усиления	0,94	0,77	0,4

Выводы

1. Разработана математическая модель потока упруго мало-сжимаемой жидкости трубопровода двигателя РД191 между НГ2 и РР. Модель верифицирована по результатам ОИ двигателей.

2. Установлено, что рост пульсации давления на участке трубопровода между НГ2 и РР происходит из-за совпадения первой лопаточной частоты НГ2 с частотой 4-ой акустической моды колебаний жидкости в трубопроводе.

3. В результате расчётного анализа 3-х способов демпфирования колебаний рекомендуется установка жиклёра на выходе из НГ2.

Литература

1. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.*, Теоретическая физика, том VI Гидродинамика. // М. «Наука»: 1988. С. 733.

Поступила 12.04.2018 г.

Зам. главного редактора:

Л.Е. Стернин

Редактор раздела:

Д.С. Мартыросов

Научно-литературный редактор:

С.М. Мазорук

Авторы:

В.В. Ткач

В.Н. Журавлёв