

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕДСТВ ПОДАВЛЕНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ТОПЛИВОПОДАЧИ ЖРД

© 2006 Я.Н. Иванов

ГКБ «Южное» им. М. К. Янгеля, г. Днепропетровск, Украина

В ГКБ «Южное» проведены экспериментальные исследования с целью поиска эффективных средств устранения кавитационных автоколебаний в системе «питающий трубопровод-насос» без ухудшения антикавитационных свойств насоса. Эта цель была достигнута изменением течения в межлопаточных каналах входной части шнека путем выполнения прорезей в лопастях.

В турбонасосной системе питания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), шнекоцентробежные насосы которых работают в режиме частичной кавитации, возможно возникновение низкочастотных автоколебаний. При определенных сочетаниях конструктивных параметров предвключенного шнека и центробежного колеса, геометрических и режимных параметров системы топливоподачи, шнекоцентробежные насосы способны генерировать низкочастотные (от нескольких герц до нескольких десятков герц) автоколебания давления и расхода жидкости, обусловленные наличием кавитационных каверн и обратных токов.

Отличительными признаками кавитационных автоколебаний являются близкая к линейной зависимость частоты автоколебаний от среднего значения входного давления

\bar{P}_1 (с повышением давления частота увеличивается) и нелинейные зависимости амплитуд колебаний давления и расхода на входе

и выходе из насоса от давления \bar{P}_1 . Кавитационные автоколебания при эксплуатации насосных систем – вредное явление, так как они вызывают вибрации конструкции и создают дополнительные динамические нагрузки на ее элементы, могут вызвать резонансные явления в системе, снижают ее надежность.

Преобладающей областью существования автоколебаний является область пониженных расходов, поэтому проблема возникновения неустойчивых режимов работы насоса особенно остра для дросселируемых двигателей.

Автоколебательные режимы работы насосов, в большей или меньшей степени, были обнаружены при отработке целого ряда ЖРД.

На основании экспериментальных работ, проведенных в нескольких КБ и НИИ, получены рекомендации по выполнению различных конструктивных мероприятий, направленных на устранение автоколебаний в системе топливоподачи ЖРД. В некоторых случаях оказались эффективными следующие мероприятия: установка спрямляющих ребер или конусной шайбы перед шнеком, перепуск части жидкости после выхода из шнека на вход в насос, применение шнеков переменного шага с малыми углами атаки ($2..3^0$), расточка на конус входной части шнека и др.

Сложность устранения кавитационных автоколебаний в разрабатываемых двигателях усугубляется тем, что входные магистрали стендов для автономных испытаний насосов и двигателей, как правило, существенно отличается в гидродинамическом отношении от натуральных. В результате этого аварийные ситуации, связанные с кавитационными автоколебаниями в системе топливоподачи двигателей возникают, в некоторых случаях, лишь в процессе летных испытаний, а их устранение требует больших материальных затрат.

Механизм возникновения кавитационных автоколебаний, предложенный В. В. Пилипенко, связан с наличием отрицательного сопротивления при входе жидкости в межлопаточные каналы шнека, обеспечивающего подвод энергии в колебательную систему, включающую, в частности, инерционность жидкости в питающем трубопроводе и упругость кавитационных каверн.

Физически это означает, что при увеличении расхода через насос абсолютная величина потерь энергии при входе жидкости в межлопаточные каналы шнека или центробежного колеса уменьшается и наоборот.

Величина отрицательного сопротивления характеризуется зависимостью коэффициента лобового сопротивления от угла атаки.

Существенное влияние на возникновение автоколебаний оказывают параметры питающей магистрали. За счет установки проточного ресивера на различных расстояниях от входа в насос можно достаточно эффективно влиять на возникновение автоколебательных режимов работы насоса. В зависимости от геометрических размеров и гидравлического сопротивления питающей магистрали один и тот же насос может работать либо устойчиво, либо неустойчиво.

В ГКБ “Южное” проведены экспериментальные исследования с целью поиска эффективных средств устранения кавитационных автоколебаний в системе “питающий трубопровод-насос” без ухудшения антикавитационных свойств насоса. Эта цель была достигнута изменением течения в межлопаточных каналах входной части шнека путем выполнения прорезей в лопастях.

Шнек с прорезями лопастей представляет собой двух или трехзаходное шнековое колесо, на входном участке которого на всю высоту лопастей выполняется определенное число кольцевых прорезей, нормальных оси шнека, расположенных на определенном расстоянии друг от друга.

На разработанную в ГКБ “Южное” конструкцию получен патент Украины № 73789 под названием “Шнекоцентробежный насос”.

Прорези служат для перетекания жидкости с напорной стороны лопасти на всасывающую. При этом одновременно действуют несколько факторов, стабилизирующих систему по отношению к кавитационным автоколебаниям.

1. Короткие лопасти шнека работают в режиме суперкавитации.

2. Уменьшается градиент давления на входе в межлопаточные каналы шнека на постоянном радиусе.

3. Увеличиваются гидравлические потери в межлопаточных каналах шнека.

Наиболее важный из этих факторов – уменьшение градиента давления в межлопаточном канале на постоянном радиусе.

Количество прорезей не может быть выбрано произвольно и определяется плотностью решетки ряда, заключенного между со-

седними прорезями, равномерно расположенными на входной части шнека.

Выполнение прорезей на входной части шнека вышеуказанным образом приводит к уменьшению объема кавитационных камер в шнеке, длина которых не может быть больше длины лопасти одного ряда благодаря перетеканию жидкости с напорной стороны лопасти через щели между рядами.

Поворот потока на величину угла атаки в межлопаточных каналах обычного шнека завершается на входной части решетки лопастей, на длине, где плотность решетки составляет $\tau \approx 1$.

В предлагаемом насосе перетекание значительных количеств жидкости с напорной стороны лопасти на всасывающую через последовательно расположенные по длине лопасти прорези препятствуют повороту потока на величину угла атаки на входной части шнека. Поворот завершается постепенно на всей длине межлопаточного канала.

Подтверждением вышеизложенного является увеличение статистического напора по длине шнека. На обычном шнеке без прорезей статический напор достигает своей максимальной величины при $\tau \approx 1 \dots 1,5$ и далее не увеличивается. На шнеке с прорезями статический напор увеличивается плавно на всей длине.

Это свидетельствует об уменьшении градиента давления в цилиндрических сечениях шнека на различных радиусах.

Уменьшение градиента давления в межлопаточном канале (на постоянном радиусе) приводит к уменьшению энергии, подводимой в колебательную систему и поддерживающей незатухающие колебания: уменьшается отрицательное гидравлическое сопротивление на входе в шнек, в частности, интенсивность обратных токов на входе в шнек ослабляется или они вовсе отсутствуют.

Предлагаемый шнекоцентробежный насос схематически изображен на рис. 1.

Шнековый преднасос 1, состоящий из спиральных лопастей 2, расположенных на втулке, установлен во всасывающем канале 3 насоса.

Сплошные спиральные лопасти 2 с постоянным или переменным шагом винтовой

Работоспособность предлагаемого устройства многократно проверялась в составе разных ЖРД. Проведенные испытания подтвердили высокую эффективность предлагаемого шнекоцентробежного насоса для устранения кавитационных автоколебаний. Устройство было внедрено в ТНА ЖРД разработки КБ "Южное" и КБ "Энергомаш", в которых применяются до настоящего времени. В обоих случаях повышение устойчивости было достигнуто без ухудшения антикавитационных свойств насоса.

Список литературы

1. Пилипенко В.В., Задонцев В.А., Натанзон М.С. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем, М.: Машиностроение, 1977.
2. Пилипенко В.В., Задонцев В.А., Иванов Я.Н., Дрозд В.А. Подавление кавитационных автоколебаний в гидравлической системе со шнекоцентробежным насосом / Прикладные задачи гидрогазодинамики и теплообмена в энергетических установках. – Киев: Наук. думка, 1989. - С. 14-26.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON REVEALING EFFECTIVE MEANS FOR SUPPRESSING CAVITATION SELF-EXCITING OSCILLATIONS IN A PROPELLANTS SUPPLY SYSTEM OF LRE

© 2006 Ya.N. Ivanov

The self-exciting oscillations in LRE propellants supply systems can provoke resonance oscillations of engine design elements and breakdown of some its units. They can also influence longitudinal stability of rockets, since their frequency values are usually close to a frequency range of longitudinal oscillation first modes for elastic bodies of liquid propellant launchers.

In order to increase stability of LRE propellants supply system and longitudinal stability of launchers a special design of screw inducer (screw with radial slots in each blade) has been developed that allow to suppress the cavitation self-exciting oscillations very effectively.