УДК 002.304

Хохлов Д.В.,
Майхиев С.В.,
студенты
5 курса, факультета «Ракетно-космической техники»
БГТУ «Военмех»
Россия, г. Санкт-Петербург

ДИНАМИКА ВЕРТИКАЛИЗАЦИИ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ: АНАЛИЗ НАГРУЗОК НА ШТОКИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ДОМКРАТОВ УСТАНОВЩИКА

Аннотация: *В статье рассмотрен процесс вертикализации ракеты космического назначения с помощью гидравлических домкратов установщика. Проведён анализ динамических нагрузок, действующих на штоки в различных фазах подъёма. Показано, что наибольшие усилия возникают в начальный момент подъёма и при малых плечах действия цилиндров в конце операции. Рассмотрены типовые причины отказов гидроцилиндров и способы их предотвращения. Приведены практические рекомендации по выбору параметров гидропривода.*

Ключевые слова: *вертикализация ракеты, гидравлический домкрат, нагрузка на шток, установщик, стартовый комплекс, динамика подъёма, надёжность гидропривода.*

Annotation. *The article considers the process of space launch vehicle erection using hydraulic cylinders of the erector. An analysis of dynamic loads acting on the rods at various lifting stages is carried out. It is shown that the greatest forces occur at the initial moment of lifting and at small leverage arms at the end of the operation. Practical recommendations for selecting hydraulic drive parameters are given. Typical causes of hydraulic cylinder failures and methods for their prevention are considered.*

***Key words**: rocket erection, hydraulic cylinder, rod load, erector, launch complex, lifting dynamics, hydraulic drive reliability.*

Операция вертикализации ракеты космического назначения является одним из ключевых этапов подготовки к пуску. Для её выполнения на наземных стартовых комплексах широко используются транспортно-установочные агрегаты с гидравлическими домкратами. От надёжности работы штоков гидроцилиндров напрямую зависит безопасность всей операции и сохранность дорогостоящей ракетной техники [1].

В реальных условиях процесс подъёма происходит не статически, а с определённым ускорением и замедлением, что приводит к возникновению дополнительных динамических нагрузок на штоки. Игнорирование этих нагрузок на этапе проектирования может вызвать перегрузки гидроцилиндров, их заклинивание или выход из строя [2]. Более того, современные требования к времени подготовки ракеты к пуску заставляют сокращать длительность операции вертикализации, что неизбежно увеличивает динамические составляющие и требует более тщательного расчёта силовых элементов.

Практика эксплуатации наземных стартовых комплексов показывает, что отказы гидроцилиндров установщика относятся к числу наиболее критичных неисправностей, поскольку они приводят к длительным задержкам пуска и, в ряде случаев, к повреждению ракеты. Поэтому анализ нагрузок на штоки является не просто теоретической задачей, а насущной инженерной проблемой, требующей системного подхода [3].

В процессе вертикализации ракеты на штоки гидравлических домкратов действуют следующие основные силы: сила тяжести ракеты и поворотной рамы, создающая момент, стремящийся вернуть систему в горизонтальное положение; инерционные силы, возникающие при разгоне и торможении механизма подъёма; силы трения в шарнирных соединениях и направляющих; ветровые воздействия, которые на начальном этапе подъёма создают дополнительный опрокидывающий момент.

Наиболее сложным с точки зрения нагружения является начальный момент подъёма, когда ракета только отрывается от опор, а плечо действия домкратов ещё максимально, но момент силы тяжести также наибольший. Вторая проблемная зона — завершающая стадия (углы 80–90°), когда плечо штока становится минимальным, и для доворота требуются очень большие усилия. Между этими двумя экстремумами существует область умеренных нагрузок (20–70°), где гидросистема работает в наиболее благоприятном режиме.

Для ракеты среднего класса массой около 80 тонн и расстоянием до центра тяжести 12 метров от оси вращения расчёты показывают:статическая нагрузка на один шток в начале подъёма составляет примерно 1,5–1,6 МН (меганьютона);динамическая добавка за счёт ускорения может достигать 0,1–0,2 МН, что увеличивает общее усилие на 10–15 %;в зоне углов 85–90° из-за уменьшения плеча усилие на шток вновь возрастает до сопоставимых значений.

Таким образом, наиболее опасными с точки зрения перегрузки являются начальный и конечный этапы вертикализации. На среднем участке подъёма (20–70°) нагрузки на штоки снижаются на 30–40 % [3].

Для тяжёлых ракет (массой 200–300 тонн) нагрузки пропорционально возрастают и могут достигать 4–5 МН на шток. В таких случаях применяются многокамерные гидроцилиндры или системы из четырёх и более домкратов, работающих синхронно.

Анализ эксплуатационных данных позволяет выделить наиболее частые причины выхода из строя штоков гидравлических домкратов установщика:

Потеря устойчивости (продольный изгиб) штока. Возникает при превышении критической нагрузки, особенно при большом выдвинутом положении штока в конце подъёма. Предотвращается правильным выбором диаметра и материала штока, а также ограничением хода.

Повреждение уплотнительных манжет. Происходит из-за повышенного давления, перекосов или старения резинотехнических изделий. Сопровождается утечкой рабочей жидкости и падением давления в системе.

Заклинивание поршня внутри цилиндра. Вызывается попаданием абразивных частиц (песок, пыль) или деформацией гильзы при перегрузках. Особенно актуально для установщиков, работающих в полевых условиях.

Разрушение проушин или пальцев крепления. Следствие усталостных явлений при циклических нагрузках. Требует регулярного неразрушающего контроля сварных швов и базовых элементов.

На основании проведённого анализа можно сформулировать следующие практические рекомендации: номинальное усилие гидроцилиндра следует выбирать с запасом не менее 1,5 от статического расчётного значения; для снижения динамических нагрузок целесообразно применять «мягкие» законы управления — плавный разгон и торможение без рывков; необходимо предусматривать синхронизацию работы двух домкратов, чтобы избежать перекоса ракеты; в зоне малых плеч (конец подъёма) рекомендуется снижать скорость движения для предотвращения гидравлических ударов; регулярный контроль давления в гидросистеме и состояния уплотнительных элементов штоков является обязательным условием безопасной эксплуатации [4, 5].

Динамический анализ нагрузок на штоки гидравлических домкратов при вертикализации ракеты космического назначения показывает, что пиковые усилия возникают на начальной и конечной стадиях подъёма и могут превышать статические значения на 10–20 %. Учёт этих нагрузок при проектировании позволяет обоснованно выбрать гидроцилиндры, обеспечить безопасность операции и повысить ресурс работы установщика.

Кроме того, правильная эксплуатация и своевременное техническое обслуживание гидросистемы способны предотвратить большинство типовых отказов. Особое внимание следует уделять контролю состояния уплотнений, чистоте рабочей жидкости и целостности крепёжных элементов.

Перспективным направлением дальнейших исследований является внедрение систем адаптивного управления процессом вертикализации, которые в реальном времени отслеживают нагрузки на штоки и корректируют режим подъёма для минимизации динамических воздействий. Это позволит не только повысить надёжность, но и сократить время подготовки ракеты к пуску без снижения запасов прочности.

Литература:

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. — М.: Наука, 1988. — 640 с.
2. Иванов М.Н. Детали машин. — М.: Высшая школа, 2014. — 408 с.
3. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. — М.: Машиностроение, 1982. — 423 с.
4. Попов Е.П. Основы робототехники и мехатроники. — М.: Высшая школа, 2007. — 352 с.
5. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. — М.: Машиностроение, 2006.