

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В СИСТЕМЕ ЗАПУСКА ЖРД МНОГОКРАТНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Введение и постановка задач исследования

В жидкостных ракетных двигателях многократного включения для верхних ступеней ракет-носителей разработки ГП «Конструкторское бюро «Южное» применяются системы запуска, в которых раскрутка турбо-насосного агрегата [1] осуществляется сжатым газом. Особенностью систем является использование высокорасходных пневмоуправляемых регуляторов, поддерживающих постоянное давление газа на входе в коллектор основной или пусковой турбины, что необходимо для обеспечения идентичности процессов запуска при всех включениях двигателя.

Регулятор является основным агрегатом, определяющим переходные процессы в системе запуска при её включении в работу и выключении. Для определения динамических характеристик регулятора давления и анализа его работы при взаимодействии с другими агрегатами системы запуска двигателя проводились испытания в составе наземного стенда. В качестве рабочей среды использовался воздух.

При отработке двигателя РД861К были опробованы два варианта пневмосистемы запуска, рабочим телом которой является гелий. Первый вариант (рис. 1) включал в себя два аккумулятора давления (шарбаллоны 1 и 11), впускной и выпускной магистральные трубопроводы 2 и 6, высокорасходный электропневмоклапан (ЭПК) непрямого действия 4, редуктор управляющего давления 10, ЭПК 9 с дренажом и трубопроводы линии управляющего давления. По циклограмме запуска команда на включение ЭПК 4 (подача давления на вход в регулятор 5) подавалась раньше, чем на включение ЭПК 9, который подавал давление гелия в управляющую полость регулятора 5. После открытия регулятора газ поступал в коллектор турбины.

Второй вариант системы запуска отличается от описанного тем, что вместо ЭПК 4 использовался высокорасходный пневмоуправляемый клапан (ПК). Этот вариант был применен как окончательный. В данной статье приведены материалы только по первому варианту, который представляет наибольший интерес для исследователя, поскольку переходные процессы в нём более выражены.

В пневмосистеме использовался регулятор оригинальной конструкции [2], поэтому основной целью работы являлась проверка его работоспособности и исследование динамических характеристик. Для этого необходимо было решить несколько задач:

– изготовить специальный пневматический стенд;

- доработать в случае необходимости конструкцию регулятора;
- обработать результаты огневых испытаний и сделать вывод о возможности использования стенда для физического моделирования работы пневмосистемы запуска ЖРД;
- получить необходимые данные для настройки математической модели [3, 4] рассматриваемой пневмосистемы;
- сравнить результаты испытаний с результатами расчета.

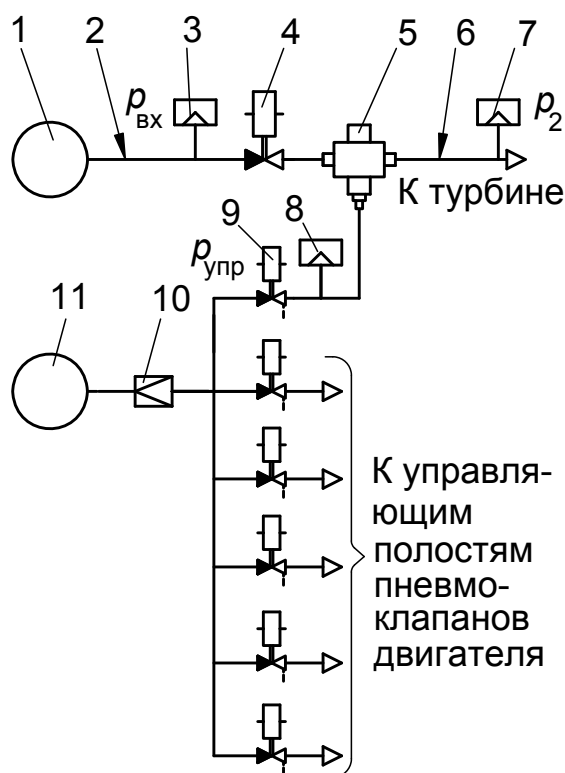


Рисунок 1 – Схема пневмосистемы запуска ЖРД с ЭПК: 1, 11 – шаробаллоны; 2, 6 – входной и выходной трубопроводы; 3, 7, 8 – первичные преобразователи давления; 4 – высокорасходный ЭПК; 5 – регулятор давления; 9 – ЭПК с дренажом; 10 – редуктор давления

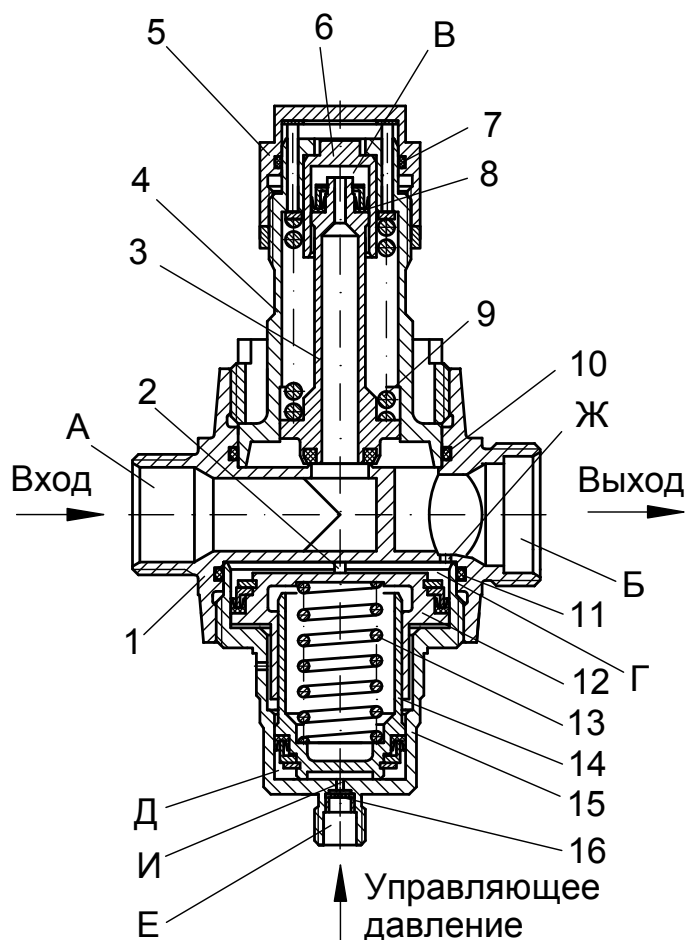


Рисунок 2 – Регулятор давления газа: 1 – корпус; 2 – толкатель; 3 – клапан; 4, 15 – крышки; 5 – колпак; 6 – стакан; 7, 10, 11 – кольца уплотнительные; 8 – манжета; 9, 13 – пружины; 12, 14 – поршни; 16 – сетка; А, Б, В, Г, Д, Е – полости; И – жиклер в управляющей полости ($d_{ж5}$); Ж – жиклер обратной связи ($d_{ж3}$)

Назначение и особенности функционирования регулятора

Конструкция регулятора 5 показана на рис. 2. Его чувствительный элемент – блок поршней 12 и 14, а исполнительный элемент – дроссель типа сопло-заслонка, образованный клапаном 3 и седлом в корпусе 1. Клапан и поршни кинематически связаны друг с другом толкателями 2.

Клапан нормально закрыт. В нерабочем положении усилием пружины 9 клапан 3 прижат к седлу, поршень 12 отжат толкателями 2 в нижнее положение, а поршень 14 усилием пружины 13 отжат вниз до упора в торец крышки 15. Газ высокого давления из шаробаллона подводится во входную полость А и отводится к турбине через противоположный резьбовой штуцер из выходной полости Б. Настройка регулятора на требуемое выходное давление и приведение его в рабочее положение осуществляется пружиной 9 и подачей управляющего давления в полость Е.

Через осевое отверстие в клапане 3 высокое давление подается в разгрузочную полость В между стаканом 6 и манжетой 8. Диаметры манжеты 8 и седла одинаковы, поэтому входное давление не может открыть клапан, и он остается в закрытом положении, пока не будет подано управляющее давление. После его подачи сила, действующая на блок поршней 12 и 14, преодолевая силу пружины 9, отжимает клапан от седла, и газ из входной полости через образовавшийся дросселирующий зазор между клапаном и седлом попадает в выходную. Из выходной полости через жиклер обратной связи Ж газ поступает в надпоршневую (демпфирующую) полость Г. На выходе устанавливается давление, на которое клапан настроен при изготовлении. При несоответствии выходного давления настроечному значению изменяется баланс сил на подвижных элементах, клапан перемещается относительно седла, и за счет изменения расхода газа это несоответствие устраняется.

Точная настройка осуществляется вращением колпака 5. При этом изменяется усилие пружины 9. Пружина 13 фиксирует положение поршней в нерабочем положении клапана. В рабочем положении под действием сил давления поршни прижаты друг к другу, и поэтому усилие пружины 13 не влияет на настройку и точность. Для обеспечения требований по динамике в торце крышки 15 выполнен дозирующий жиклер И, сообщающий полости Е и Д, он защищен от засорения сеткой 16.

Диаметр седла регулятора – 16 мм. Диаметр жиклёра обратной связи $d_{жз} = 3$ мм.

Конструктивная схема регулятора отличается от традиционной использованием пневмоуправления вместо пружинной настройки, что позволило снизить массу и выполнить его нормально закрытым. Последнее исключает чрезмерную раскрутку турбины при запуске двигателя.

Для испытаний изготовлен экспериментальный образец регулятора (рис. 3). В нем установлены штуцеры 2, 5 и 6 для замера давления в

пружинной, управляющей и демпфирующей полостях, переходник 4 для подвода управляющего давления и преобразователь 3 хода поршня.

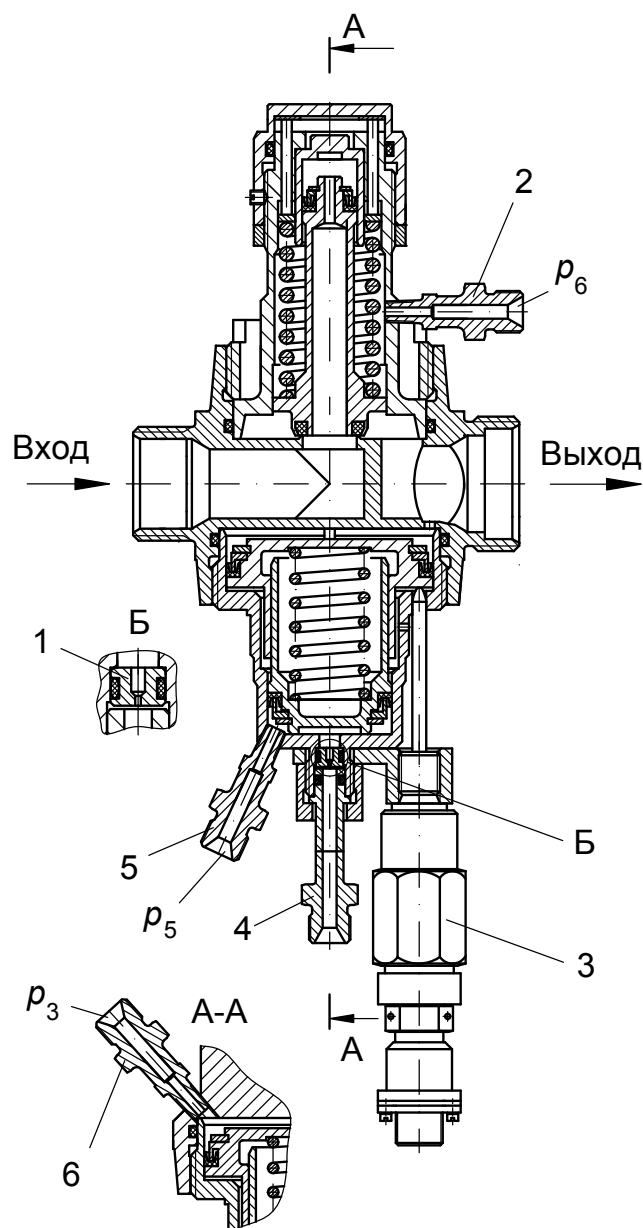


Рисунок 3 – Экспериментальный экземпляр регулятора давления:
 1 – сменный жиклер диаметром $d_{ж5}$; 2 – штуцер для замера давления p_6 в пружинной полости клапана; 3 – первичный преобразователь хода поршня; 4 – штуцер для подачи давления в управляющую полость; 5 – штуцер для замера давления p_5 в управляющей полости; 6 – штуцер для замера давления p_3 в демпфирующей полости

На рис. 3 рядом с замерными штуцерами показан и измеряемый параметр в соответствии с его обозначением на других рисунках статьи. Для возможности влиять на переходный процесс жиклер 1 на входе в управляющую полость выполнен сменным. При испытаниях использовался комплект жиклеров с диаметрами 1,6; 0,8; 0,5 и 0,3 мм.

Стенд для отработки динамических характеристик

Схема испытательного стенда показана на рис. 4. В состав стенда входят следующие элементы: входной и выходной магистральные трубопроводы 3 и 8; трубопроводы линии управляющего давления; баллонная батарея 1; металлоулавливатель 11, который предназначен для отвода воздуха после жиклера 10; фильтр очистки воздуха 2 с фильтрующей сеткой 20 мкм объемом 12 дм³.

Подвод воздуха к баллонной батарее 2 и к редуктору 17 осуществлялся через вентили и стендовые редукторы давления (на рисунке не показаны) непосредственно от заводской сети высокого давления. Длины трубопроводов стенда не соответствовали их значениям на двигателе.

Рабочим газом анализируемой пневмосистемы на двигателе является гелий. Преимущество гелия перед воздухом и азотом заключается в том, что он имеет меньшую молекулярную массу, а следовательно, при одинаковых условиях меньшую плотность и большую удельную теплоемкость. Это обстоятельство позволяет снизить массу заправленного газом баллона, что особенно актуально для верхних ступеней ракет-носителей. Кроме того, при одинаковых давлениях и температурах скорость звука в гелии в три раза выше, чем в воздухе. Последнее важно для пневмосистем управления, поскольку время срабатывания пневмоагрегатов, в управляющие полости которых подается гелий, меньше, чем агрегатов, работающих на воздухе или азоте. Показатель адиабаты гелия ($k = 1,66$) выше, чем воздуха или азота ($k = 1,4$), поэтому адиабатический коэффициент сжимаемости гелия $\beta = 1/(kp)$ на 18% меньше, что также способствует уменьшению времени срабатывания агрегатов.

Физическое моделирование системы в условиях стенда проводилось на воздухе. Замена рабочего тела позволила снизить затраты на проведение испытаний. Известно, что на гелии из-за отличий в значениях газовой постоянной и показателя адиабаты при одинаковых объемах полостей переходные процессы проходят примерно в три раза быстрее, чем на воздухе [5]. Это учитывалось при оценке результатов испытаний.

Применяемая при испытаниях система измерений быстроменяющихся давлений включает в себя первичный и вторичный преобразователи и регистратор. В качестве первичных преобразователей использованы индуктивные датчики избыточного давления ДДИ-20, а для измерения перемещений – преобразователи разработки ГП «КБ «Южное».

Датчик избыточного давления ДДИ-20 предназначен для измерения быстроменяющихся давлений в пневматических и гидравлических системах и рассчитан на работу в комплекте с индуктивным высокочастотным двухканальным преобразователем ИВП-2. Преобразователь ИВП-2 является вторичным преобразователем в системе измерения

быстроменяющихся давлений и предназначен для преобразования комплексного сопротивления датчика в электрическое напряжение.

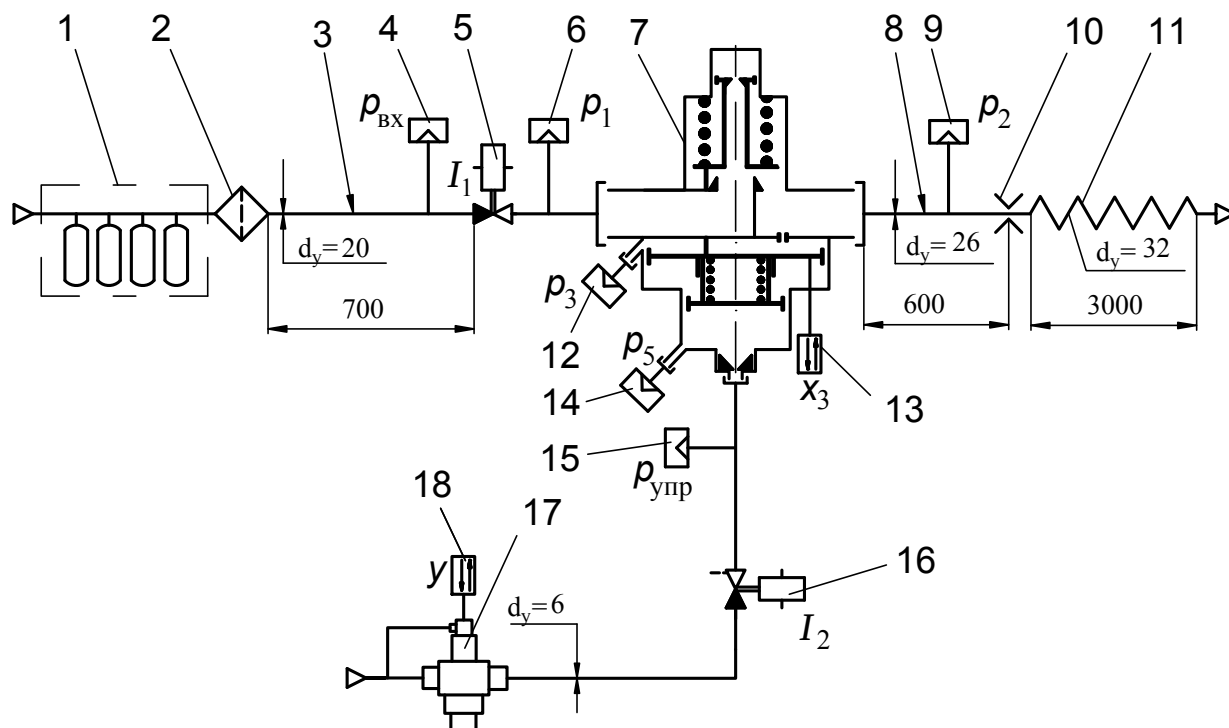


Рисунок 4 – Схема испытательного стенда:

1 – баллонная батарея $V = 28 \text{ дм}^3$; 2 – фильтр; 3, 8 – входной и выходной трубопроводы; 4, 6, 9, 12, 14, 15 – первичные преобразователи давления ДДИ-20; 5 – ЭПК непрямого действия; 7 – регулятор давления; 10 – жиклер $d_{ж2} = 19 \text{ мм}$; 11 – металлорукав; 13, 18 – первичные преобразователи хода индуктивного типа; 16 – ЭПК прямого действия с дренажом; 17 – редуктор управляющего давления

В качестве регистратора использовался программируемый измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) МИК-300.

Основные характеристики датчика ДДИ-20:

частотный диапазон измеряемых давлений – от 0 до 10 кГц;

собственная частота мембраны (расчетная) – более 20 кГц.

Основные характеристики преобразователя ИВП-2:

несущая частота – 40 кГц;

диапазон частот измеряемых пульсаций давления – 0...10 кГц.

Для обеспечения приемлемой точности измерений непосредственно перед каждой серией экспериментов проводилась аттестация преобразователей ДДИ-20 и преобразователя хода совместно со вторичными преобразователями и замерными линиями. Аттестация проводилась в соответствии с методикой поверки преобразователей ДДИ-20. Для эталонного измерения давления использовался грузопоршневой манометр МП-600 ГОСТ 8291-83 класса точности 0,05, а измерения перемещения

– индикаторная головка ГОСТ 9696-75 с ценой деления 0,002 мм. За счет этого обеспечивалась точность измерений давления и перемещения не ниже 1,5%.

Метод исследования

Методика испытаний заключалась в регистрации переходных процессов при включении и выключении регулятора, т.е. при подаче и прекращении подачи давления на его вход и в управляющую полость.

Испытания проводили по следующей методике:

- заправляли баллонную батарею 1 сжатым воздухом;
- подавали на вход в редуктор 17 давление 28 МПа;
- включали ЭПК 5 (подача давления на вход в регулятор);
- через 1 – 3 с включали ЭПК 16 (подача давления в управляющую полость регулятора);
- через 1 – 3 с выключали ЭПК 5 (прекращение подачи давления на вход в регулятор);
- выключали ЭПК 16 (одновременное прекращение подачи давления и открытие дренажа из управляющей полости регулятора).

Регулятор включался в работу и выключался при подаче и прекращении подачи давления на вход и в его управляющую полость.

Сигналы преобразователей 4, 6, 9, 12, 13, 14, 15 и 18, а также изменение электрического тока в обмотках электромагнитов ЭПК 5 и ЭПК 16 регистрировали с частотой опроса 16 кГц. Тип преобразователей давления выбран с учетом их высоких динамических характеристик.

Эксперименты проводились при входном давлении 28...34 МПа, управляющем давлении 6,5 МПа и расходе воздуха через регулятор до 1 кг/с. Расход обеспечивался диаметром тарированного жиклера на выходе из регулятора и при экспериментах не измерялся. На указанных режимах регулятор поддерживал давление на выходе $p_2 = 2 \pm 0,17$ МПа.

Результаты испытаний

При запуске двигателя работу рассматриваемой пневмосистемы условно можно разделить на три участка – фазу подготовки, фазу включения и фазу выключения. Каждый участок начинается с переходного процесса. Все участки имитировались подачей соответствующих команд на автоматику испытательного стенда в соответствии со штатной циклограммой системы запуска двигателя. Экспериментальные графики переходных процессов на всех фазах работы системы показаны на рис. 5; обозначения параметров соответствуют рис. 3 и 4. Ниже на рисунках показано изменение параметров в системе на каждой из этих фаз.

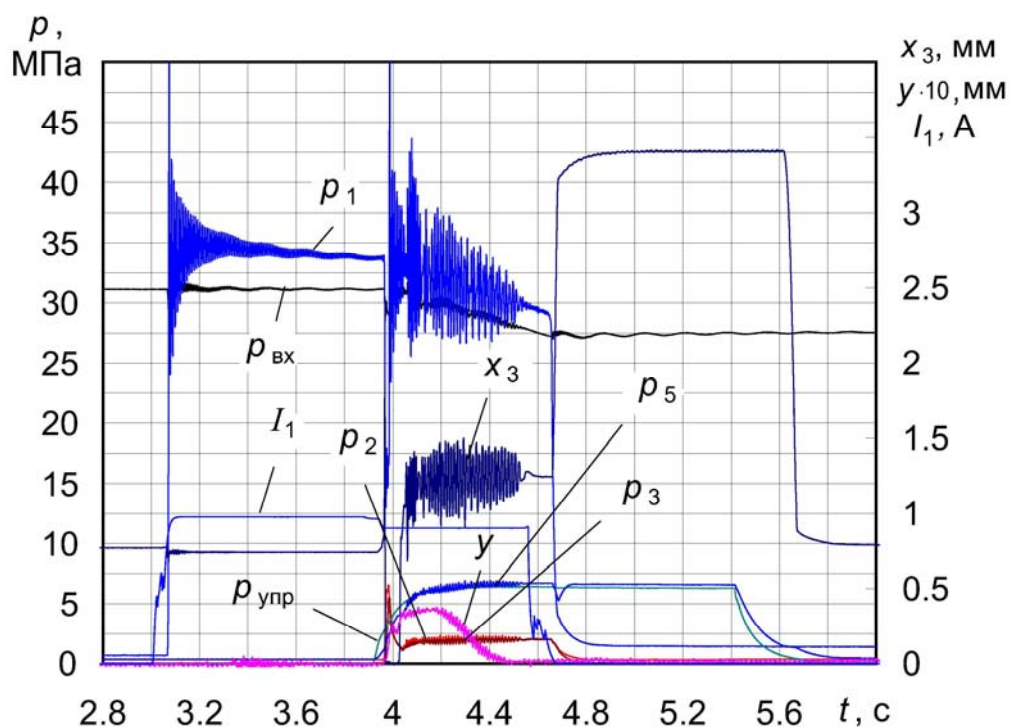


Рисунок 5 – Переходные процессы в системе при $d_{ж5} = 0,8$ мм и $p_{вх} = 31$ МПа

Фаза подготовки начинается с подачи напряжения на катушку электромагнита ЭПК 5 (рис. 4), его открытия и поступления на вход в регулятор 7 сжатого воздуха под давлением p_1 . Процесс открытия ЭПК 5 характеризуется изменением тока в обмотке электромагнита. На рис. 6 показано изменение тока и давлений $p_{вх}$, p_1 . В точках 0 – 6 происходит намагничивание катушки, движение якоря, выбирание зазоров между деталями электромагнита и перемещение пилотного клапана ЭПК.

Момент начала движения основного клапана ЭПК соответствует точкам 7 и 8 – начинается падение давления $p_{вх}$ и рост давления p_1 . С момента подачи напряжения (точка 0 на графике) до начала открытия основного клапана (точка 7) проходит примерно 0,063 с, а вся фаза подготовки заканчивается, когда на входе в регулятор устанавливается давление p_1 .

Длительность фазы зависит от объема полости между ЭПК 5 и регулятором 7. И в двигателе, и на стенде ЭПК и регулятор стыковались непосредственно друг с другом, и объем между ними был один и тот же.

Темп роста давления p_1 перед регулятором – $\approx 10^4$ МПа/с. Этот пневмоудар на входе в регулятор сопровождается колебаниями давления p_1 с частотой примерно 100 Гц. В начальный момент амплитуда колебаний достигает $\approx 9,3$ МПа, а затем она плавно уменьшается. Колебания затухают через 0,45 с. Амплитуда колебаний давления $p_{вх}$ перед ЭПК 5 меньше – 1,6 МПа в начальный момент и до 0,15 МПа через

$\approx 0,88$ с. Очевидно, что параметры колебаний зависят от геометрических размеров входной магистрали.

Несовпадение давлений $p_{вх}$ и p_1 после открытия ЭПК 5 объясняется изменением характеристики преобразователя ДДИ-20 по давлению p_1 из-за воздействия пневмоудара.

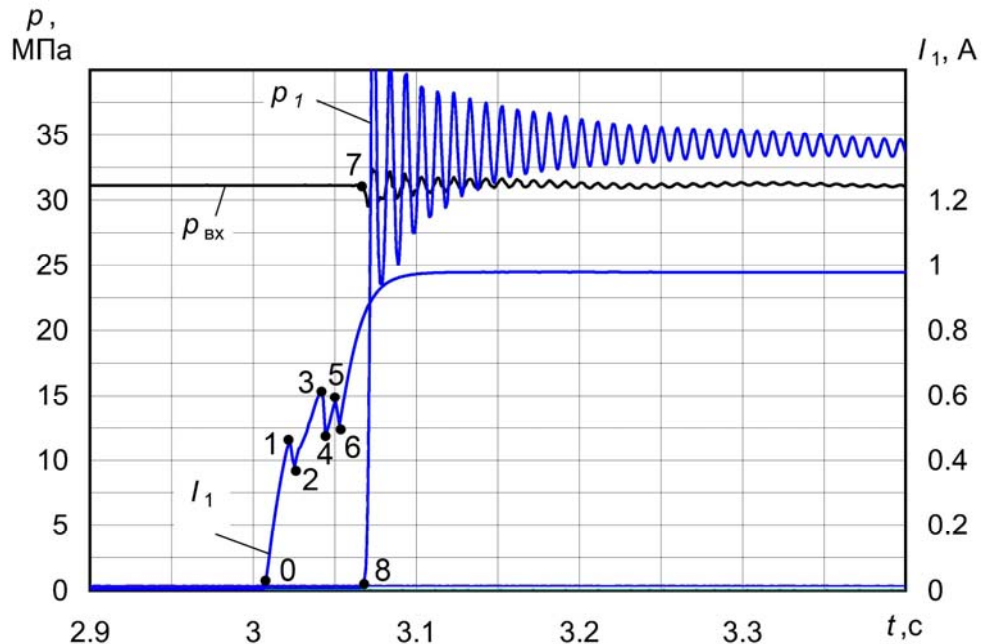


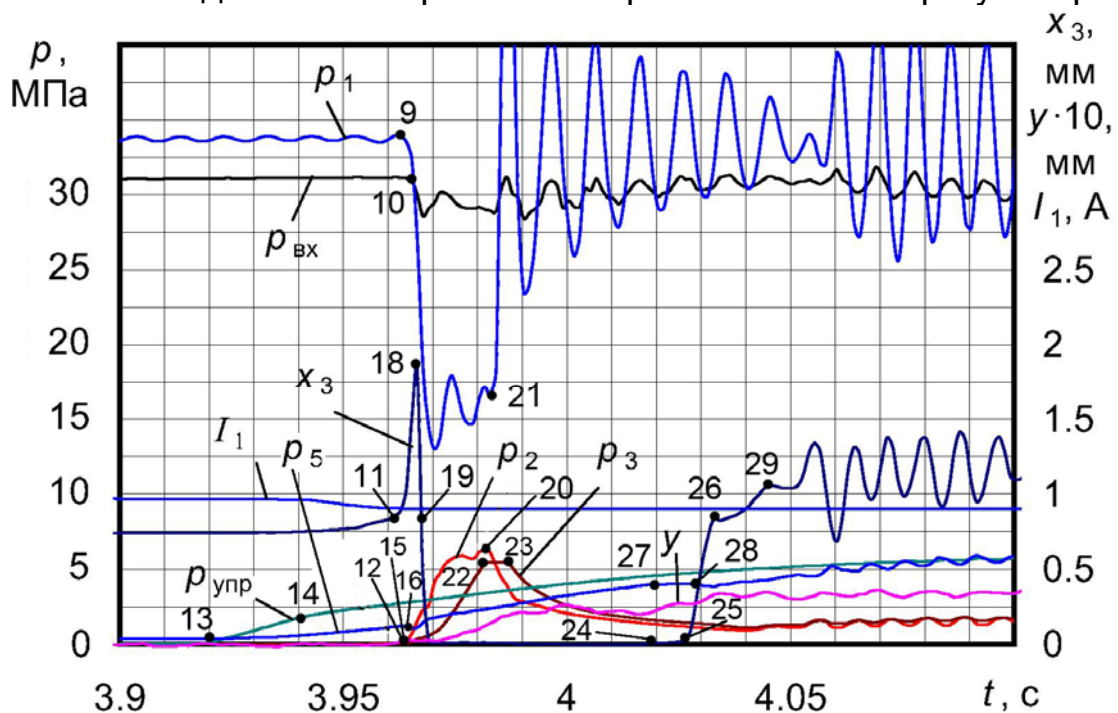
Рисунок 6 – Изменение параметров $p_{вх}$, p_1 и I_1 при $d_{ж5} = 0,8$ мм и $p_{вх} = 31$ МПа

Перед фазой включения на вход в регулятор 7 подано давление p_1 , его клапан перекрывает седло, на выходе давление p_2 равно атмосферному, на вход в редуктор управляющего давления 17 подано высокое давление 28 МПа, а за ним установилось давление безрасходного стопрежима. ЭПК 16 закрыт. Эта фаза начинается с момента подачи команды на включение ЭПК 16. Очевидно, что он начинает открываться не позднее точки 13 (рис. 7). В этой точке начинается рост давления $p_{упр}$ на входе в управляющую полость регулятора 7. В точке 14 он полностью открывается, о чем свидетельствует излом на кривой $p_{упр}$. До этой точки оно росло за счет увеличения хода клапана в ЭПК 16 и роста давления $p_{упр}$, а после – только за счет давления $p_{упр}$.

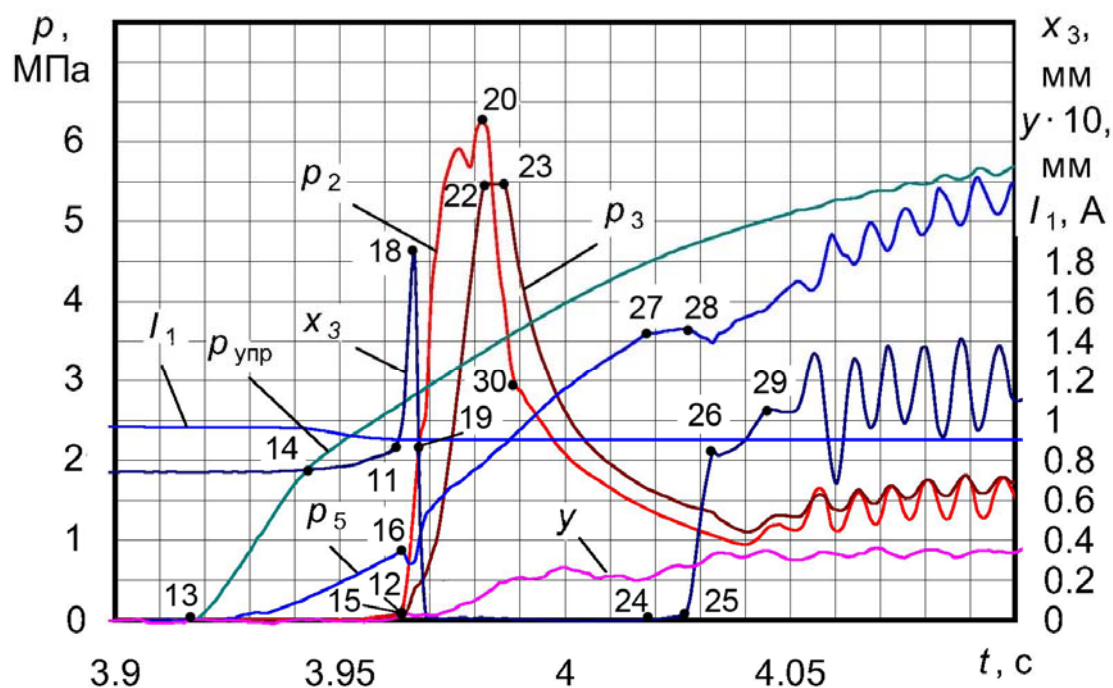
Давление на выходе из редуктора 17 уменьшается, и в точке 15 он начинает открываться, о чем свидетельствует движение его клапана. Это происходит через $\approx 0,05$ с после начала роста давления $p_{упр}$ (точка 13); задержка зависит от объема полости между ЭПК 16 и редуктором 17.

Почти одновременно с началом открытия ЭПК 16 и началом роста давления $p_{упр}$ начинает увеличиваться давление p_5 в управляющей полости регулятора 7. Этот момент зависит от диаметра жиклера 1 (рис. 3) на

входе в управляющую полость. Небольшой максимум на кривой p_5 ($\approx 3,93$ с) соответствует началу движения поршня 14 (рис. 2). После контакта поршней 14 и 12 давление p_5 возрастает вплоть до точки 16 – начала совместного движения поршней и открытия клапана 3 регулятора.



а



б

Рисунок 7 – Изменение параметров на фазе включения при $d_{ж5} = 0,8$ мм и $p_{вх} = 31$ МПа: а – весь процесс; б – фрагмент

Этот момент точнее всего можно определить по кривой p_1 , поскольку из-за малого объема между ЭПК 5 и регулятором давление в данной полости падает быстрее других при появлении расхода через регулятор. Клапан регулятора начинает открываться в точке 9. Это согласуется с изменением других зарегистрированных параметров – уменьшением давления $p_{вх}$ (точка 10), началом резкого увеличения хода поршня 12 (точка 11), началом роста давления p_2 на выходе из регулятора (точка 12) и давления p_3 в его демпфирующей полости (точка 15). Самым очевидным подтверждением является излом на кривой p_5 в точке 16. Плавное увеличение хода x_3 поршня 12 регулятора до точки 11 объясняется выбиранием зазоров и биений между деталями регулятора.

До точки 18 результирующее усилие на подвижную систему регулятора направлено в сторону открытия клапана. Клапан вместе с поршнями перемещается вверх на ход, примерно равный 1,1 мм; за счет этого резко увеличивается давление p_2 в выходной и p_3 в демпфирующей полостях регулятора. В точке 19 клапан садится на седло, а поршни продолжают движение, достигают упора в нижнюю крышку 15 и находятся в этом положении до точки 25 ($t = 4,027$ с).

В точке 18 при резком движении поршня 12 в нижнее положение, разрывается его кинематическая связь с клапаном 3, который остается в открытом положении. Это происходит за счет поршневого эффекта между клапаном 3 и крышкой 4, и усилия пружины 9 не хватает для возврата клапана. О том, что клапан открыт, свидетельствует продолжающийся рост давлений p_2 до 6,2 МПа ($t = 3,98$ с, точка 20) и p_3 до 5,5 МПа.

С момента времени $t = 3,98$ с клапан начинает закрываться – наблюдается резкое падение давления p_2 (точка 20) и рост давления p_1 на входе в регулятор (точка 21). Поршни при этом остаются в нижнем положении, поскольку усилие от давления p_3 превышает усилие от давления p_5 в управляющей полости. Промежуток, в течение которого клапан находится в открытом положении и без связи с поршнем, равен 0,015 с.

По мере снижения давления p_2 при закрытии клапана и роста давления p_5 баланс сил на поршнях изменяется. До точки пересечения кривых p_2 и p_3 идет заполнение демпфирующей полости регулятора через жиклёр обратной связи. После этого она начинает опорожняться – давление p_3 становится больше, чем p_2 . Клапан уже сел на седло, но поршень все еще находится в крайнем отжатом положении. В точке 24 он начинает двигаться вверх (положения соответствуют рис. 7 б). Из-за этого снижается темп роста давления p_5 (точки 27-28) и увеличивается ход x_3 (точки 24-25). В точке 26 устанавливается контакт с клапаном 3, клапан в интервале времени между точками 26-29 уже открывается, о чем свидетельствует рост давления p_2 на этом участке. В точке $t \approx 4,06$ с устанавливается колебательный процесс регулирования. От начала открытия ЭПК 16 прошло $\approx 0,13$ с. На этом заканчивается фаза включения

регулятора. Излом кривой p_2 в точке 30 свидетельствует об изменении режима истечения через жиклёр 10 (рис. 4). Это связано с тем, что истечение из жиклера в атмосферу происходит через гибкий металлорукав длиной 3 м, в котором возникает подпор давления.

Отметим наличие колебаний давления p_1 на входе в регулятор с частотой ≈ 110 Гц и начальной амплитудой до 10 МПа. Колебания не вызваны самим регулятором, поскольку они возникают раньше, чем он включается в работу. Это колебания газа во входной магистрали и толчком к их появлению является резкое закрытие клапана. Колебания входного давления p_1 вызывают вынужденные колебания в регуляторе. Параметры x_3 и p_5 изменяются синхронно, но в противофазе, поскольку p_5 изменяется за счет изменения объема управляющей полости. Давление $p_{упр}$ не колеблется: незначительные колебания расхода не могут изменить давление $p_{упр}$ в сравнительно большой емкости. Давление p_2 и ход x_3 изменяются синхронно и синфазно: увеличивается x_3 – увеличивается p_2 , и наоборот. Давления p_2 и p_3 изменяются практически синфазно с небольшим отставанием p_3 – это сказывается влияние объема демпфирующей полости и сопротивления его жиклёра обратной связи.

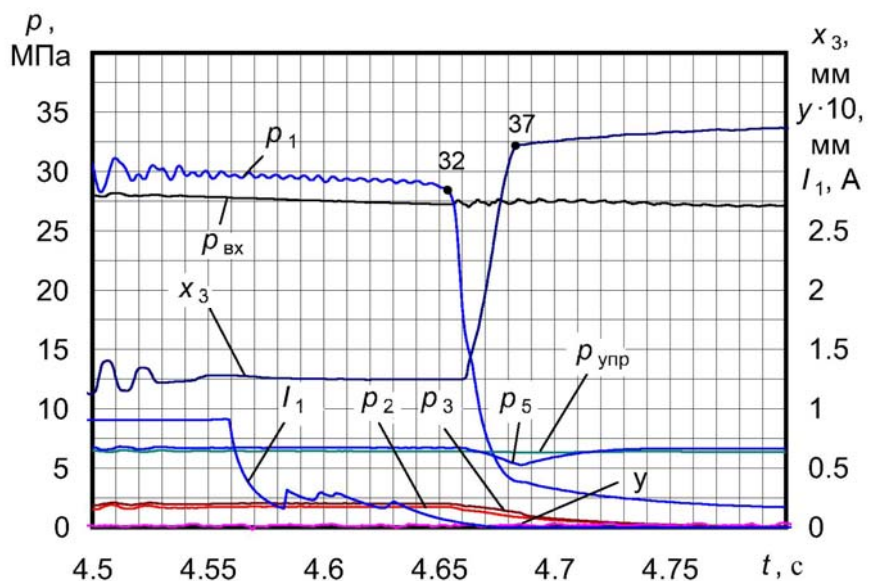
При экспериментах работу регулятора прекращали, закрывая ЭПК 5 на входе в регулятор.

Фаза выключения (рис. 8) начинается с момента снятия напряжения с ЭПК 5 (точка 31). К этому моменту прекратились колебания давления во входном трубопроводе, но совпадение этих моментов – случайное, поскольку команда на выключение ЭПК 5 подавалась директивно. Через $\approx 0,1$ с ЭПК 5 закрывается, что подтверждается началом резкого уменьшения давления p_1 (точка 32), и в этот же момент времени начинают снижаться давления p_2 и p_3 (точка 33), почти одновременно (точка 34) – начинает подниматься клапан регулятора, и в точке 37 он открывается полностью. Процесс движения поршня в регуляторе на открытие четко фиксируется точками 35-38 на кривой p_5 и 36-39 на кривой p_3 . Резкие изломы на этих кривых соответствуют началу и концу движения и изменению объемов управляющей и демпфирующей полостей регулятора. Процесс от момента снятия напряжения с ЭПК 5 до момента полного открытия регулятора длится $\approx 0,125$ с.

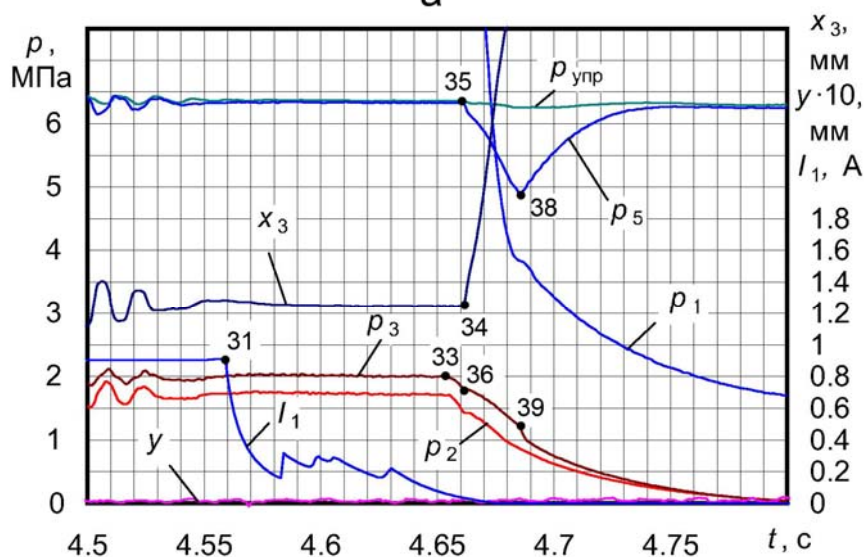
При этих испытаниях не был установлен преобразователь хода клапана 3 регулятора 7, но поведение записанных параметров косвенно указывало на отрыв клапана от толкателей и разрыв кинематической связи между клапаном и поршнями. В связи с этим возникла необходимость в разработке нелинейной математической модели, которая учитывает отрывы между элементами подвижной системы регулятора [3, 4].

При испытаниях исследовалось влияние сопротивления линии управления на переходные процессы, например, влияние диаметра $d_{ж5}$ жиклера на входе в управляющую полость регулятора на длительность переходных процессов при его включении и выключении (таблица).

С уменьшением диаметра увеличивается время выхода регулятора на режим настройки, когда давление p_5 достигает уровня $p_{\text{упр}}$.



а



б

Рисунок 8 – Изменение параметров на фазе выключения при $d_{\text{ж5}} = 0,8$ мм и $p_{\text{вх}} = 30$ МПа: а – весь процесс; б – фрагмент

Зависимость длительности процессов от диаметра $d_{\text{ж5}}$

$d_{\text{ж5}}, \text{ мм}$	Включение				Выключение	
	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	Заброс давления $p_2, \text{ МПа}$	$t_4, \text{ с}$	$t_5, \text{ с}$
0,3	0,825	0,080	0,1	8,2	0,029	0,34
0,5	0,260	0,065	0,1	6,9	0,023	0,25
0,8	0,200	0,066	0,1	6,2	0,025	0,24
1,6	0,180	0,065	0,09	8,8	0,014	0,18

В таблице приняты следующие обозначения: t_1 – время выхода регулятора на режим настройки ($p_5 = p_{\text{упр}}$); t_2 – время, в течение которого разорвана связь между клапаном и поршнем; t_3 – время до начала движения клапана на открытие; t_4 – время движения клапана на открытие; t_5 – время до полного спада давления p_2 .

При выключении время t_3 от снятия напряжения с ЭПК 5 до начала движения клапана в регуляторе 7 на открытие не зависит от $d_{\text{ж5}}$. Время t_4 движения клапана от начала и время t_5 до полного спада давления p_2 с увеличением $d_{\text{ж5}}$ от 0,3 до 1,6 мм уменьшается почти в два раза. Это объясняется уменьшением времени опорожнения управляющей полости регулятора через жиклер $d_{\text{ж5}}$.

С точки зрения длительности фаз выхода на режим и останова жиклер диаметром 0,8 мм оказался оптимальным. С этим жиклером заброс давления p_2 при включении регулятора получился ниже, чем с другими жиклерами. При увеличении диаметра жиклера до 1,6 мм и при уменьшении до 0,5 мм длительность фаз изменяется мало.

По штатной циклограмме работы двигатель запускается пять раз. Из-за расходования запаса гелия давление в шаробаллоне 1 (рис. 1) от пуска к пуску падает. В связи с этим проверено его влияние на динамические процессы. Испытания проводили со всеми четырьмя жиклерами $d_{\text{ж5}}$ (1,6; 0,8; 0,5 и 0,3 мм). По результатам испытаний построена графическая зависимость (рис. 9) относительного заброса p_2/p_2^* от относительного давления $p_{\text{вх}}/p_{\text{вх}}^*$ (звездочкой отмечены значения давлений p_2 и $p_{\text{вх}}$ при первом включении). Увеличение давления $p_{\text{вх}}$ увеличивает величину заброса давления p_2 на фазе включения и длительность колебательного процесса после включения регулятора.

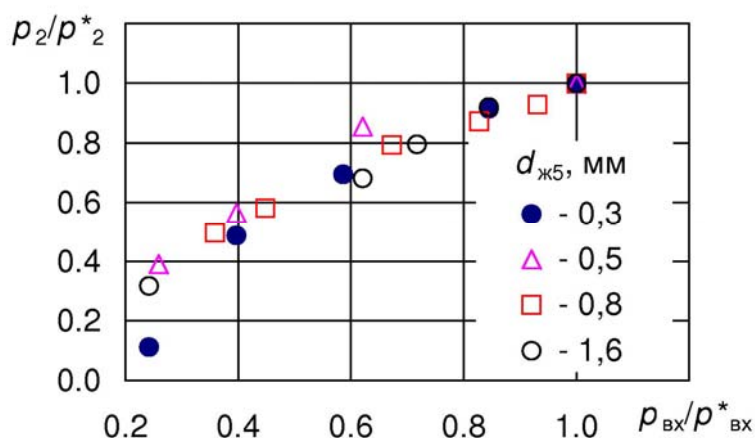


Рисунок 9 – Зависимость относительного заброса выходного давления от относительного входного давления

Как показали огневые испытания, ни то, ни другое не влияет на динамику запуска двигателя, но экстремальная динамика деталей регулятора снижает его надежность.

Сравнение результатов экспериментов на стенде и при работе на двигателе

При огневых испытаниях двигателя (ОИ) измеряются три параметра, характеризующие работу регулятора – давление на входе $p_{вх}$, на выходе p_2 и на входе в управляющую полость $p_{упр}$. На рис. 10 приведены совмещенные графики изменения параметров при ОИ в составе двигателя и на стенде. Для удобства сравнения нумерация ключевых точек на этих рисунках принята такая, что и на предыдущих. Масштабы времени по оси абсцисс выбраны одинаковыми, а ключевые точки – начало роста $p_{упр}$ на фазе включения и начало падения давления $p_{вх}$ – совмещены. Из ОИ для этого сравнения выбрано испытание двигателя, при котором давление на входе было наиболее близким к испытаниям на стенде. Отличие испытаний – в частоте дискретизации и типе преобразователей. При ОИ параметры регистрируются с частотой дискретизации 400 Гц и используются преобразователи Вт 206, при стендовых – соответственно, 16 кГц и ДДИ-20. Кроме того, при ОИ рабочим телом для регулятора является гелий, а при испытаниях на стенде – воздух.

Процесс включения на стенде растянут по времени из-за медленного роста управляющего давления, что объясняется большим объемом полости между ЭПК 16 и регулятором 7. На стенде он равен 30 см^3 , а на двигателе – $\approx 14,5 \text{ см}^3$. Кроме того, отличаются и объемы полостей от редуктора 17 до ЭПК 16. Они равны соответственно 200 и 50 см^3 .

В результате время от появления давления $p_{упр}$ (точка 13) до момента, когда на выходе из регулятора устанавливается настроечная величина давления, на стенде – $\approx 0,24 \text{ с}$, а на двигателе – $\approx 0,04 \text{ с}$. Величина заброса давления p_2 на стенде – $\approx 5,3 \text{ МПа}$, а на двигателе – $\approx 4,8 \text{ МПа}$. Длительность этих забросов примерно одинакова – $0,03 \text{ с}$.

Выбранные для сравнения режимы испытания на стенде и двигателе на фазе выключения отличаются условиями выключения. На двигателе одновременно с выключением ЭПК 16 (сброс давления $p_{упр}$) закрывался и ЭПК 4 (рис. 1) на входе в регулятор, а на стенде ЭПК 16 закрывали позже, чем ЭПК 5. Это обстоятельство вместе с указанными выше различиями в объемах полостей по линии подачи управляющего давления привело к большой разнице в длительности процесса спада давления p_2 . На стенде он длится $\approx 0,15 \text{ с}$, а на двигателе – $\approx 0,035 \text{ с}$.

Качественно процессы включения и выключения регулятора на двигателе и стенде протекают одинаково. Проведенные на стенде испытания с дополнительными замерами позволили понять процессы в регуляторе и его взаимодействие с другими агрегатами системы запуска.

«Седло» на кривой давления $p_{упр}$ на двигателе объясняется включением дополнительного потребителя гелия после редуктора управляющего давления, чего не было при испытаниях на стенде.

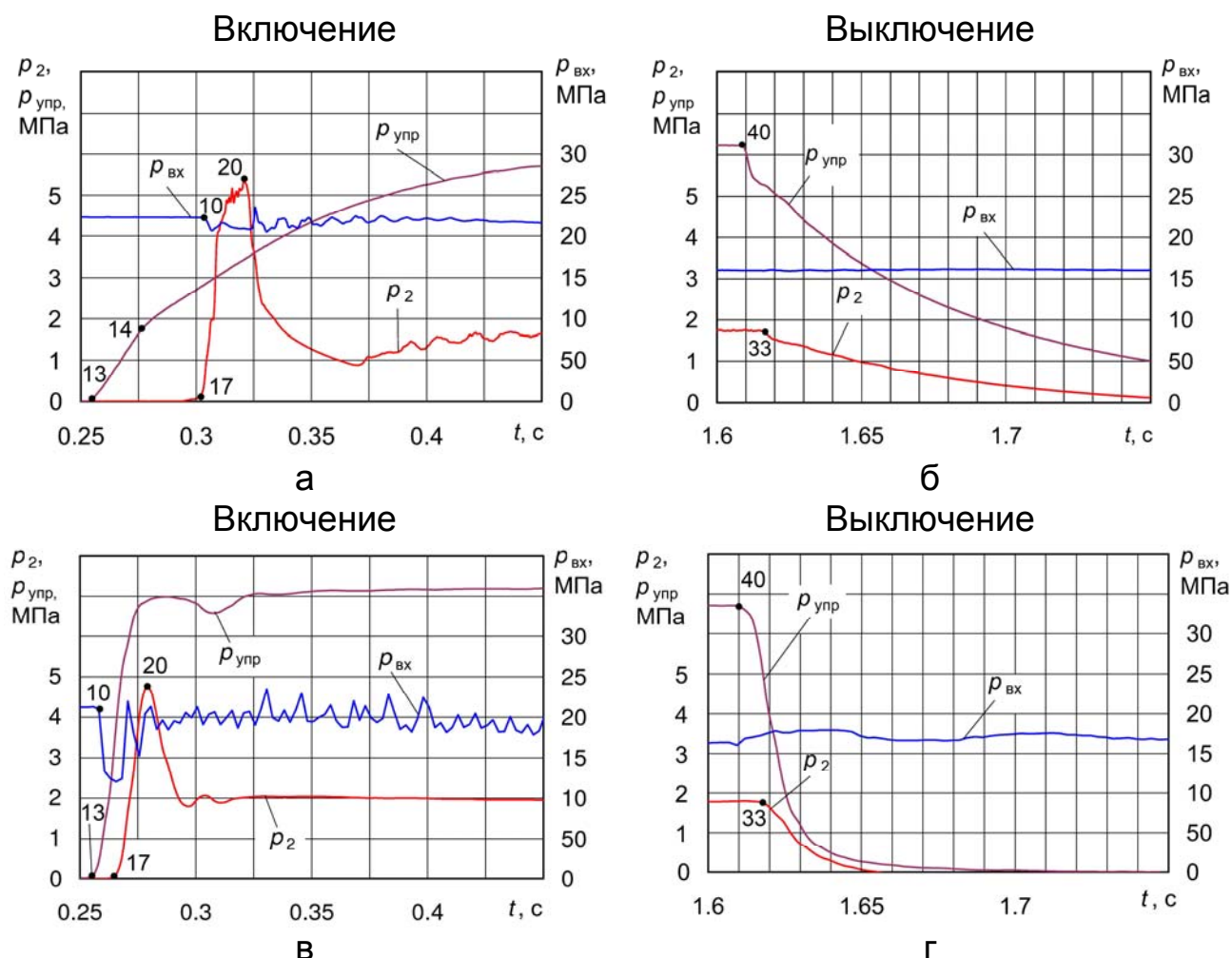


Рисунок 10 – Изменение параметров при включении и выключении регулятора: а, б – на стенде; в, г – на двигателе

Обнаруженные при испытаниях на стенде забросы давления p_2 при включении регулятора были устранены доработкой конструкции клапана. Для уменьшения сопротивления при заполнении пружинной полости регулятора в момент его открытия на направляющей поверхности клапана были выполнены фрезерованные пазы (рис. 11).

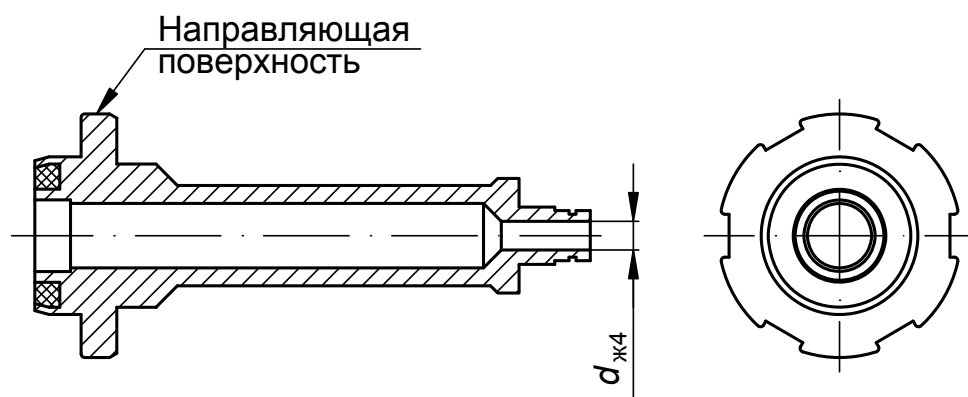


Рисунок 11 – Клапан с пазами на направляющей поверхности

После уменьшения на 46% площади проходного сечения расходного жиклера 10 (рис. 6) в испытательном стенде забросы выходного давления p_2 наблюдались и на фазе подготовки. После резкой подачи давления p_1 на вход в регулятор его клапан отрывался от седла. Это происходило при высоких давлениях p_1 (рис. 12).

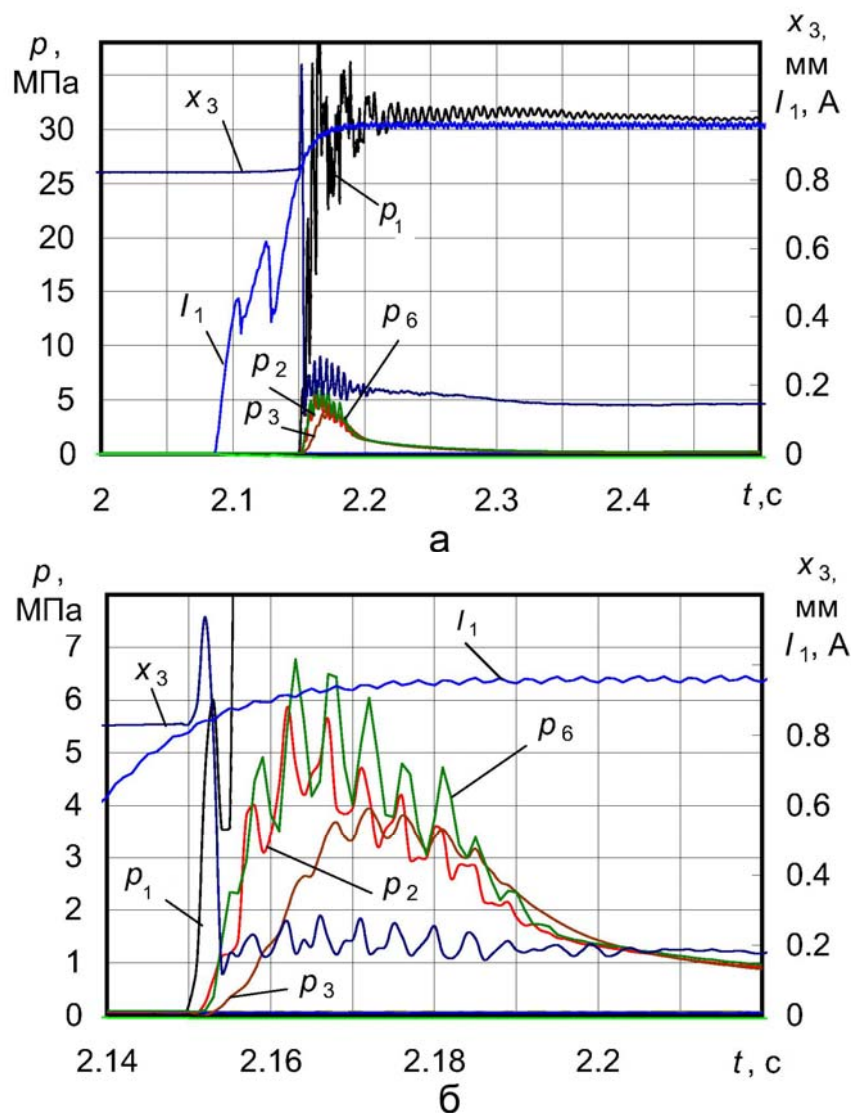


Рисунок 12 – Изменение параметров на фазе подготовки при $d_{ж4} = 4$ мм, $V_4 = 9,2$ мм, $p_1 = 31,6$ МПа: а – весь процесс; б – фрагмент

Очевидно, что величина подъема клапана и продолжительность его пребывания в поднятом состоянии зависит от скорости заполнения разгрузочной полости В регулятора (рис. 2), то есть от сопротивления осевого отверстия $d_{ж4}$ в хвостовике клапана (рис. 11) и объема разгрузочной полости регулятора. Для экспериментального определения этой зависимости проведены испытания с двумя диаметрами $d_{ж4}$ – 3 и 4 мм и с четырьмя объемами V_4 – 9,2; 4,1; 1,8; и 1,4 см³.

При увеличении объема разгрузочной полости регулятора растет вероятность отрыва клапана от седла. Из рис. 12, на котором показан

процесс фазы подготовки при $d_{ж2} = 15,7$ мм, $p_1 = 31,6$ МПа, $d_{ж4} = 4$ мм и $V_4 = 9,2$ см³, видно, что поршень регулятора (x_3) начинает подниматься практически одновременно с началом роста давления p_1 . Давление $p_{упр}$ в этот момент отсутствует, поэтому причиной подъема клапана может быть только перепад давлений на осевом отверстии $d_{ж4}$ в его хвостовике, а поршень перемещается под действием пружины 13 (рис. 2). Таким образом, причиной заброса выходного давления на фазе подготовки было медленное заполнение разгрузочной полости.

Забросы p_2 выше максимального настроенного значения регулятора (более 2,17 МПа) были при объемах $V_4 = 4,1$ см³ и 9,2 см³. Самый большой заброс $p_2 = 5,4$ МПа наблюдался при $V_4 = 9,2$ см³ и $p_1 = 31,6$ МПа. Величина заброса увеличивается с увеличением p_1 и объема V_4 . При $V_4 = 1,8$ см³ и высоких входных давлениях возможен отрыв клапана от седла. Величины забросов не превышали 0,14 МПа.

С учетом результатов проведенных экспериментов диаметр жиклера в хвостовике клапана был увеличен с 3 до 4 мм. При таком размере жиклера и при объеме $V_4 = 1,4$ см³, который соответствует штатному, забросов p_2 не наблюдалось даже при самых больших p_1 и V_4 .

Сопоставление результатов экспериментального и расчетного исследования

В статьях [3, 4] описана методика расчета газодинамических процессов в пневмосистеме, исследуемой в данной статье, и даны результаты расчета. Сопоставление результатов расчета и эксперимента показало их удовлетворительную сходимость.

В статье [6] дана схема и описан метод расчета пневмосистемы запуска, отвечающей её второму варианту, и проведено сопоставление результатов расчета с результатами огневых испытаний. В этом случае также наблюдалось их хорошее соответствие.

Кроме того, для второго варианта системы было выполнено расчетное исследование по определению возможности использования пневматического стенда для физического моделирования при замене гелия на сжатый воздух. Было показано, что для согласования динамических характеристик регулятора на стенде и в составе двигателя необходимо провести следующие мероприятия:

- уменьшить гидравлическое сопротивление металлорукава 11 (рис. 4);

- увеличить площади проходных сечений дросселей линии управляющего давления в $k = 2,65$ раза относительно размеров для двигателя, где k определяется как квадратный корень из отношения плотностей воздуха и гелия при одинаковых температурах и давлениях. Это обеспечит идентичные скорости течения газов через дроссели;

– уменьшить длины трубопроводов в соответствии с уменьшением скорости звука, то есть для линии управляющего давления – в 2,65 раза, а для входного 3 и выходного 8 трубопроводов – в 2,9 раза.

Эффективность этих мероприятий подтверждена на рис. 13.

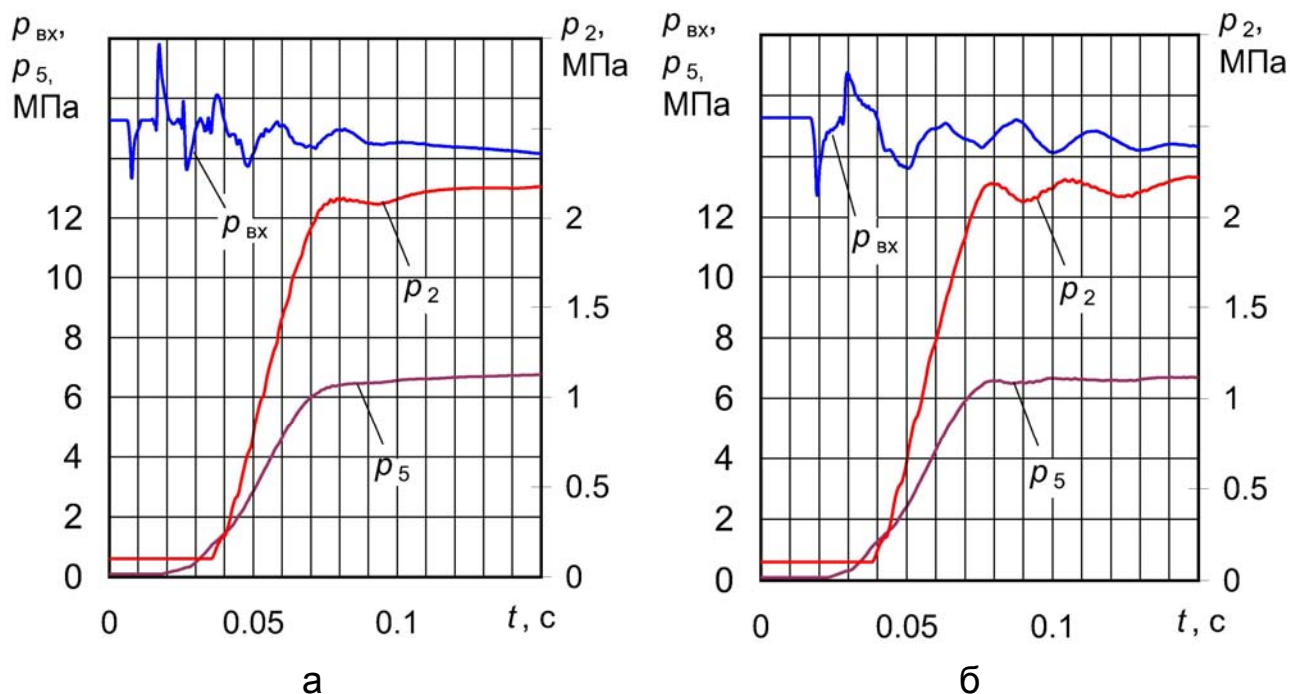


Рисунок 13 – Сопоставление кривых изменения давления при расчете включения пневмосистемы: а – работа на гелии; б – работа на сжатом воздухе (после корректировки размеров деталей стенда)

Изменение размеров дросселей и трубопроводов приводит к идентичному поведению кривых давления при включении пневмосистемы.

Выводы

1. Разработан пневматический стенд для экспериментального исследования динамических характеристик пневмосистемы.
2. Изменена конструкция регулятора в целях устранения забросов выходного давления в начале включения.
3. На основе обработки результатов огневых испытаний сделано заключение о работоспособности регулятора и о возможности использования разработанного пневматического стенда для физического моделирования динамических процессов в пневмосистеме после его доработки в соответствии со сформулированными рекомендациями.
4. Эксперименты, проведенные на стенде, показали, что использовать в линии управления пневмосистемы запуска сжатый воздух или азот недопустимо, поскольку в этом случае не будут обеспечиваться не-

обходимые динамические характеристики регулятора на фазах включения и выключения.

5. На основании выполненного динамического анализа работы пневмосистемы был составлен перечень физических эффектов, которые необходимо было учесть при её математическом моделировании, а именно: колебания клапана, инерционность газа в трубопроводах, колебания давлений в полостях регулятора, размыкание кинематической связи между элементами подвижной системы регулятора.

6. Проведенные эксперименты подтверждают основные результаты расчетного исследования [3, 4].

Список использованных источников

1. Ивченко, Л.Ф. Опыт проектирования автономной турбины ТНА двигателя РД861К [Текст] / Л.Ф. Ивченко, С.А. Дешевых, Р.Ф. Максимчук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 9(96). – С. 174–179.

2. Пат. 76857 Украина, МПК(7) G05D 16/10 Регулятор тиску газу [Текст] / Валивахін С.О., Порубаймех В.І., Шевченко С.А.; власник Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля». – № u20120527; заявл.26.03.2012; опубл. 25.01.2013, Бюл. №2.

3. Шевченко, С.А. Математическая модель регулятора давления газа [Текст] / С.А. Шевченко, С.А. Валивахин // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Х., 2014. – № 38 (1061). – С. 195 – 209.

4. Шевченко, С.А. Результаты математического моделирования переходных процессов в регуляторе давления газа [Текст] / С.А. Шевченко, С.А. Валивахин // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Х., 2014. – № 39 (1082). – С. 198 – 206.

5. Ивченко, О.Л. Динамика пневмоуправляемых клапанов [Текст] / О.Л. Ивченко // *Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст.* – 1998. – Вып. 1–2. – Дп.: ГП "КБ "Южное". – С.173–184.

6. Шевченко, С.А. Моделирование пневмосистемы запуска ЖРД при учете теплообмена газа со стенками полостей и уточнении сил, действующих на клапаны регуляторов [Текст] / С.А. Шевченко, А.Л. Григорьев, М.С. Степанов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 7(124). – С. 100–110.

Поступила в редакцию 30.10.2015.

*Рецензент: канд. техн. наук, В. С. Бойко,
ГП «Конструкторское бюро «Южное»
им. М. К. Янгеля», г. Днепропетровск.*