

УДК 621.452.2.043+621.822

В.Н. ШНЯКИН, В.Н. КОНОХ, И.И. КАЛИНИЧЕНКО, И.Ю. КУКСА

ГП Конструкторское бюро “Южное” им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина

ПЕРСПЕКТИВЫ ДРОССЕЛИРОВАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ТЯГОЙ 450 КГС С ПНЕВМОНАСОСНЫМ АГРЕГАТОМ

Представлены результаты исследований по дросселированию жидкостного ракетного двигателя тягой 450 кгс с пневмонасосной системой подачи, работающего на компонентах топлива АТ и НДМГ. Рассмотрены способы дросселирования двигателя и особенности работы пневмонасосной системы подачи на этих режимах. Найден предел дросселирования. Проведен сравнительный анализ рабочих процессов пневмонасоса при различных способах дросселирования рассматриваемой ЖРДУ, представлены зависимости, описывающие поведение основных параметров. Определено, что наиболее целесообразно дросселировать двигатель путём уменьшения давления гелия на входе в пневмонасос. Диапазон дросселирования составляет 55%.

жидкостный ракетный двигатель, система подачи ЖРД, дросселирование ЖРД, пневмонасосный агрегат

1. Формулирование проблемы и её связь с научно-практическими задачами

Отработка нового жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) требует больших материальных и временных затрат. Большинство фирм, работающих в этой области, по возможности, базируются на уже созданную, отработанную материальную базу. Это обеспечивает преемственность конструкции двигателя и, в некоторой степени, гарантирует успешность выполнения поставленной задачи.

В настоящее время ГП КБЮ ведёт отработку жидкостной ракетной двигательной установки (ЖРДУ) автономного космического буксира “Кречет”.

Данная однорежимная ЖРДУ тягой 450 кгс, выполнена по схеме с пневмонасосной системой подачи компонентов топлива, базируется на камере сгорания, разработанной для двигателя РД866. Камера сгорания отработана для нескольких режимов работы, в частности для тяги:

500 кгс при $P_K=41,5$ кгс/см² - RD866;

450 кгс при $P_K=36,5$ кгс/см² – АКБ “Кречет”;

250 кгс при $P_K=20,3$ кгс/см² – РН Вега;

200 кгс при $P_K=16,5$ кгс/см² – режим, отработанный на огневом стенде.

Учитывая сказанное выше, очень привлекательно выглядит возможность создания ЖРДУ, способную эффективно работать в диапазоне тяг от 200 до 500 кгс. При этом рассматривается как возможность создания однорежимного ЖРДУ, с возможностью выбора тяги из рассматриваемого диапазона, так и создание ЖРДУ, позволяющего изменять тягу в процессе полёта.

2. Обзор публикаций и выделение нерешённых задач

Схема рассматриваемой ЖРДУ приведена на рис. 1. Как видно из рис. 1, основным элементом системы топливоподачи, определяющим её характеристики при дросселировании ЖРДУ по тяге, является пневмонасосный агрегат (ПНА). Характеристики ПНА в составе ЖРДУ приведены в таблице 1.

Пневогидравлическая схема ПНА приведена на рис. 2. ПНА включает в себя топливные насосы окислителя 3 и горючего 1 объёмного типа и объёмные пневмоприводы 2, работающие на редуцированном гелии высокого давления от пневмоблока изделия. ПНА содержит два блока пневмоприводов с насосами; циклический режим работы каждого из блоков обеспечивается газовыми переключателями 8, взаимодействующими с концевыми клапанами 9

нажимного действия, которые размещаются в газовых полостях смежного пневмопривода.

Таблица 1

Характеристики ПНА в составе ЖРДУ

1	Рабочее тело пневмопривода	Гелий
2	Окислитель	АТ
3	Горючее	НДМГ
4	Номинальное абсолютное давление гелия на входе, кгс/см ²	23,3
5	Номинальное абсолютное давление на входе, кгс/см ² : – по линии окислителя – по линии горючего	12,626 13,188
6	Номинальное абсолютное давление на выходе из ПНА, кгс/см ² : – по линии окислителя – по линии горючего	56,45 56,94
7	Расходы компонентов топлива, кг/с – окислителя – горючего	0,966 0,429
8	Соотношение объёмных расходов компонентов топлива	1,231
9	КПД, не менее	0,77

Благодаря перекрестному задействованию переключателей и концевых клапанов пневмоприводов достигается своевременное реверсирование одноименных насосов и поддержание давлений на выходе из насосов окислителя и горючего в требуемых пределах.

Рабочие полости насосов отделены от магистралей высокого и низкого давлений ПНА обратными клапанами 4, 5, 6, 7.

Особенностью конструкции ПНА является применение насосов окислителя, горючего и пневмопривода объёмного типа, подвижные элементы которых жёстко связаны между собой. Это обеспечивает стабильное соотношение расходов компонентов топлива ($\approx \pm 0,5\%$) и обуславливает поведение системы топливоподачи при изменении гидравлического сопротивления выходных магистралей ПНА.

Для дросселирования ЖРДУ по тяге необходимо снижать расходы и выходные давления компонентов топлива ПНА.

Уравнение баланса сил на поршнях ПНА имеет следующий вид:

$$F_O \cdot (P_{O_{вых}} - P_{O_{вх}}) + F_G \cdot (P_{G_{вых}} - P_{G_{вх}}) + F_{ТРпна} - F_{He} \cdot (P_{He} - P_H) = 0, \quad (1)$$

где F_O – площадь поршня насоса окислителя;

$P_{O_{вых}}$ – давление на выходе из насоса окислителя;

$P_{O_{вх}}$ – давление на входе в насос окислителя;

F_G – площадь поршня насоса горючего;

$P_{G_{вых}}$ – давление на выходе из насоса горючего;

$P_{G_{вх}}$ – давление на входе в насос горючего;

$F_{ТРпна}$ – силы трения при движении блока поршней ПНА;

F_{He} – площадь поршня пневмопривода;

P_{He} – давление гелия в пневмопривode;

P_H – давление окружающей среды.

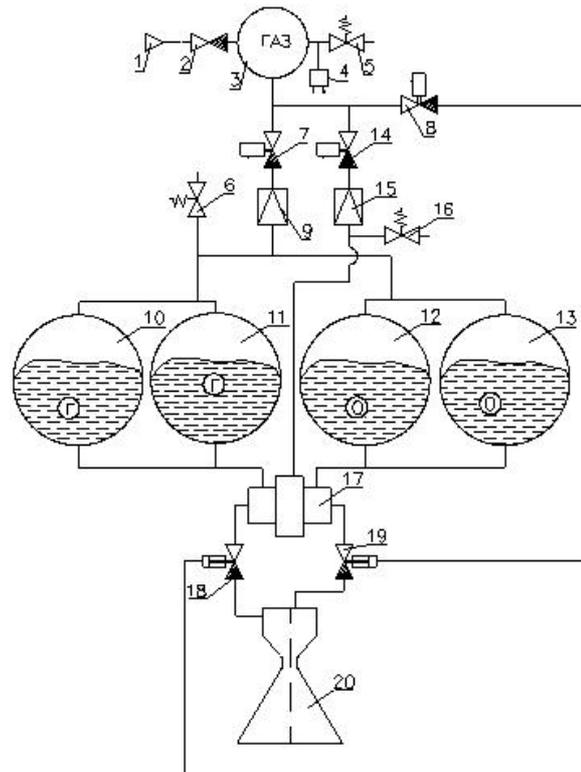


Рис. 1. Жидкостная ракетная двигательная установка с пневмонасосной системой подачи компонентов топлива.

- 1 – заправочный штуцер; 2 – клапан заправки;
- 3 – баллон с гелием; 4 – датчик давления;
- 5, 6, 16 – предохранительный клапан;
- 7, 8, 14 – электропневмоклапан;
- 9, 15 – газовый редуктор; 10, 11 – бак окислителя;
- 12, 13 – бак горючего;
- 17 – пневмонасосный агрегат;
- 18, 19 – пневмогидроклапан;
- 20 – камера сгорания.

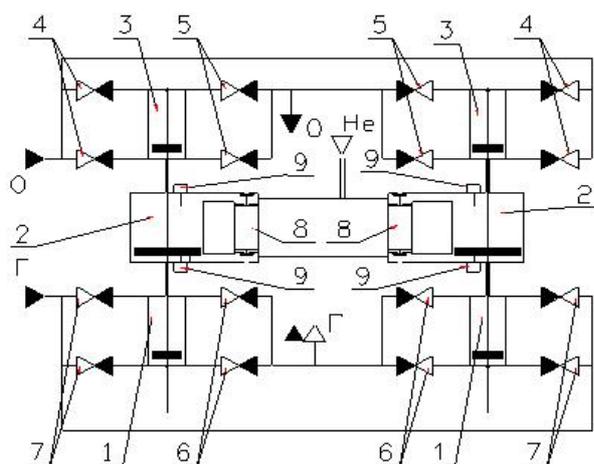


Рис. 2. Пневмонасосный агрегат, схема пневмогидравлическая.

- 1 – блок насоса горючего;
- 2 – блок пневмопривода;
- 3 – блок насоса окислителя;
- 4, 5 – обратные клапаны насоса окислителя;
- 6, 7 – обратные клапаны насоса горючего;
- 8 – газовый переключатель;
- 9 – концевой управляющий клапан;

Как видно из формулы 1 и рис. 1 дросселирование ЖРДУ по тяге возможно следующими способами:

1. Уменьшением входных давлений компонентов топлива. Для реализации этого способа дросселирования ЖРДУ необходим достаточный запас по уровню входных давлений ПНА, что возможно только для некоторых частных задач.

2. Изменением гидравлического сопротивления выходных магистралей насосов. Конструктивные особенности ПНА, а именно применение в нём объёмных насосов, подвижные органы которых жёстко связаны между собой, позволяют для регулирования тяги ЖРДУ изменять гидравлическое сопротивление магистрали только одного из компонентов, например горючего. Этот способ регулирования связан с неоправданными потерями гелия на режимах дросселирования, т.к. часть напоров насосов расходуется на преодоления гидравлического сопротивления в регулирующих органах.

3. Изменением давления гелия в пневмоприводе путём перенастройки газового редуктора, питающего ПНА. На режимах дросселирования этот способ

регулирования самый экономичный с точки зрения расходования гелия. Глубина дросселирования ЖРДУ ограничивается минимальным давлением гелия, при котором ПНА остаётся работоспособен.

3. Постановка задачи данного исследования

Задачей выполненного исследования является выявление преимуществ и особенностей различных способов дросселирования жидкостного ракетного двигателя тягой 450 кгс с пневмонасосным агрегатом.

4. Изложение основного материала с обоснованием полученных научных результатов

Дросселирование ЖРДУ путём уменьшения входных давлений компонентов топлива не эффективно из-за низкого уровня давлений в топливных баках.

Рассмотрим дросселирование ЖРДУ путём изменения гидравлического сопротивления выходной магистрали насоса горючего. То есть, конструктивно в магистраль горючего устанавливается дроссель с электроприводом, рис. 3, который позволяет изменять гидравлическое сопротивление магистрали по командам системы управления.

Для оценочных расчётов используем серийный дроссель который при расходе воды 0,62 кг/с имеет собственные потери порядка 1,79 кгс/см² и перепад при переключке на угол 280 град около 106 кгс/см².

В расчётах принимаем, что при полностью открытом дросселе ($\alpha_{др}=0$ град) гидравлическое сопротивление выходной магистрали насоса горючего такое же, как и в штатной не регулируемой ЖРДУ. На рис. 4 приведены расчётные зависимости тяги ЖРДУ – $P_{ЖРДУ}$, давления в камере сгорания – p_k , расход гелия на привод ПНА при температуре 80°С – m_{He} .

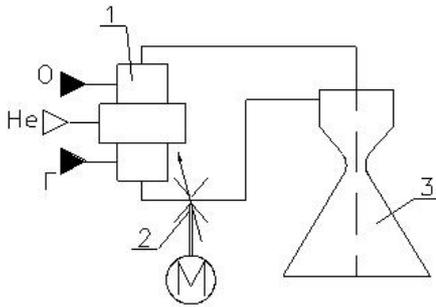


Рис. 3. Фрагмент схемы ЖРДУ с регулируемой магистралью горючего.

- 1 – пневмонасосный агрегат;
2 – дроссель с электроприводом;
3 – камера сгорания.

Эти зависимости основных параметров ЖРДУ с ПНА были получены путём аппроксимации расчётных (\blacktriangle) и экспериментальных (\blacksquare) данных.

Коэффициент корреляции $\rho=0,999$.

В качестве экспериментальных данных использовались параметры нерегулируемого жидкостного ракетного двигателя.

Остальные точки были получены расчётным путём с использованием нелинейной математической модели системы топливоподачи.

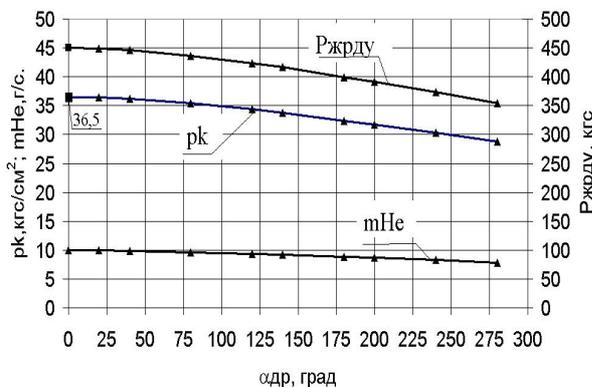


Рис. 4. Зависимость тяги ЖРДУ ($R_{жрду}$), давления в камере сгорания (pk) и расхода гелия на привод ПНА (m_{He}) от угла поворота полумуфты гидравлического дросселя ($\alpha_{др}$).

Эти параметры описываются следующими уравнениями:

$$pk(\alpha_{др}) = -6 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha_{др}^2 - 0,0129 \cdot \alpha_{др} + 36,679;$$

$$R_{жрду}(\alpha_{др}) = -0,0007 \cdot \alpha_{др}^2 - 0,1589 \cdot \alpha_{др} + 452,21;$$

$$m_{He}(\alpha_{др}) = -2 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha_{др}^2 - 0,0032 \cdot \alpha_{др} + 9,9998;$$

Полученные результаты показывают, что использование дросселя в выходной магистрали насоса горючего позволяет дросселировать ЖРДУ на 20%.

На рис. 5 приведен рабочий процесс ПНА, работающего в составе ЖРДУ, задросселированной по тяге с 450 до 350 кгс. Как видно из рис. 5, при закрытии дросселя перераспределение выходных давлений между насосами окислителя и горючего приводит к значительному росту выходного давления насоса горючего, поэтому необходим достаточный запас прочности конструкции ПНА.

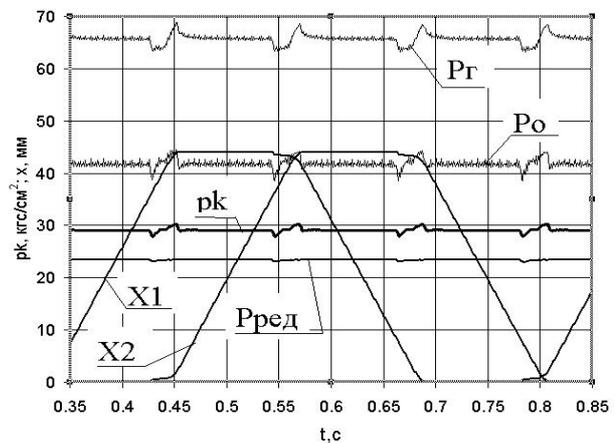


Рис. 5. Рабочий процесс ПНА, работающего в составе ЖРДУ, задросселированной по тяге до 350 кгс.
 P_g – давление на выходе из насоса окислителя;
 P_o – давление на выходе из насоса горючего;
 pk – давление в камере сгорания;
 $P_{ред}$ – давление настройки газового редуктора, питающего ПНА;
 X_1, X_2 – хода блоков поршней.

На этом режиме работы ЖРДУ в камере сгорания наблюдается провал давления продолжительностью 11 мс с максимальной амплитудой $0,98 \text{ кгс/см}^2$ и заброс давления продолжительностью 12 мс с максимальной амплитудой $1,01 \text{ кгс/см}^2$, т.е. амплитуда колебаний давления в камере сгорания составляет $\pm 3,4\%$. Частота пульсаций давления в камере сгорания $\approx 8,5 \text{ Гц}$.

Рассмотрим дросселирование рассматриваемой ЖРДУ путём изменения настройки редуктора 15, питающего ПНА 17, рис. 1.

На рис. 6 представлены расчётные зависимости тяги ЖРДУ – $P_{ЖРДУ}$, давления в камере сгорания – p_k , расход гелия на привод ПНА при температуре 80°C – m_{He} .

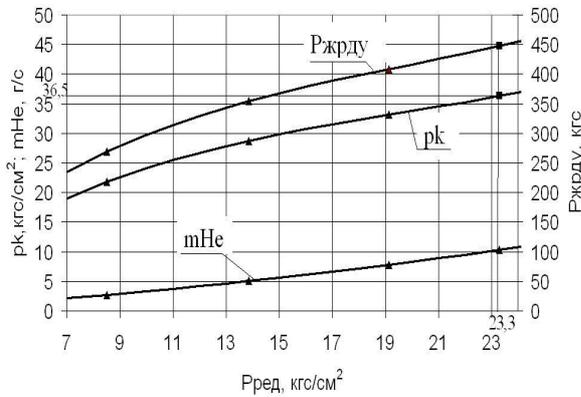


Рис. 6. Зависимость тяги ЖРДУ ($P_{ЖРДУ}$), давления в камере сгорания (p_k) и расхода гелия на привод ПНА (m_{He}) от давления настройки редуктора, питающего ПНА – $P_{ред}$

Эти параметры описываются следующими уравнениями:

$$P_{ЖРД}(P_{ред}) = 0,22672765 + 44,631013 \cdot P_{ред} - 1,7953874 \cdot P_{ред}^2 + 0,030199582 \cdot P_{ред}^3;$$

$$p_k(P_{ред}) = 0,018390132 + 3,620071 \cdot P_{ред} - 0,14562587 \cdot P_{ред}^2 + 0,0024495216 \cdot P_{ред}^3;$$

$$m_{He}(P_{ред}) = 0,0007813 + 0,24974792 \cdot P_{ред} + 0,0082672314 \cdot P_{ред}^2.$$

На рис. 7 приведен рабочий процесс ПНА в составе ЖРДУ, задросселированной по тяге с 450 до 350 кгс. На этом режиме работы ЖРДУ в камере сгорания наблюдается провал давления продолжительностью 14 мс с максимальной амплитудой $0,94 \text{ кгс/см}^2$ и заброс давления продолжительностью 16 мс с максимальной амплитудой $1,4 \text{ кгс.см}^2$, т.е. амплитуда колебаний давления в камере сгорания составляет $p_{k \text{ ном}} \begin{matrix} +4,9\% \\ -3,4\% \end{matrix}$.

Частота пульсаций давления в камере сгорания $\approx 8,5 \text{ Гц}$. Как видно из рис. 5 и 7: амплитуда и длительность провалов давления в камере сгорания

при дросселировании ЖРДУ путём изменения гидравлического сопротивления магистрали горючего и путём изменения настройки редуктора, питающего ПНА, практически не отличаются, забросы давления в камере сгорания имеют большую амплитуду в случае дросселирования ЖРДУ путём перенастройки газового редуктора, питающего ПНА (4,9% против 3,4%). Это связано с разным временем опорожнения пневмоцилиндров ПНА при различных способах дросселирования ЖРДУ.

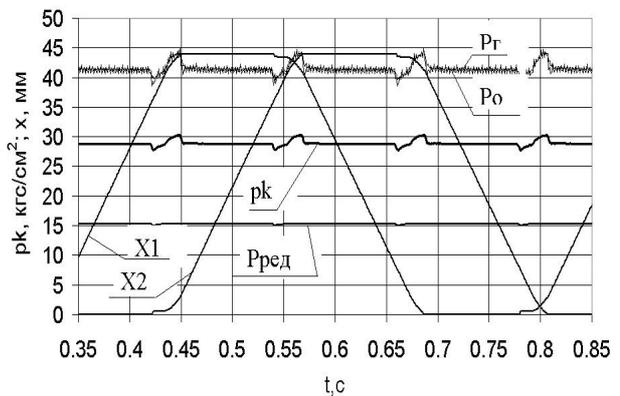


Рис. 7. Рабочий процесс ПНА, работающего в составе ЖРДУ, задросселированной по тяге до 350 кгс путём перенастройки газового редуктора, питающего ПНА: P_G – давление на выходе из насоса горючего; P_O – давление на выходе из насоса окислителя; p_k – давление в камере сгорания; $P_{ред}$ – давление настройки газового редуктора, питающего ПНА; $X1, X2$ – хода блоков поршней.

Конструкция ПНА обеспечивает его надёжную работу при давлении гелия в пневмоприводе не ниже $7,3 \text{ кгс/см}^2$. Это позволяет осуществлять дросселирование ЖРДУ по тяге до 250 кгс.

Рабочий процесс ЖРДУ, задросселированной по тяге до 250 кгс приведен на рис. 8.

В момент реверсирования блоков поршней пневмонасосного агрегата наблюдается провал давления в камере сгорания продолжительностью $0,012 \text{ с}$ на величину $0,8 \text{ кгс/см}^2$, что составляет 3,9% от номинального значения для данного режима работы ЖРДУ, и заброс давления продолжительностью $0,05 \text{ с}$ на величину $1,15 \text{ кгс/см}^2$, что составляет

5,6%. Частота пульсаций давления в камере сгорания $\approx 6,4$ Гц.

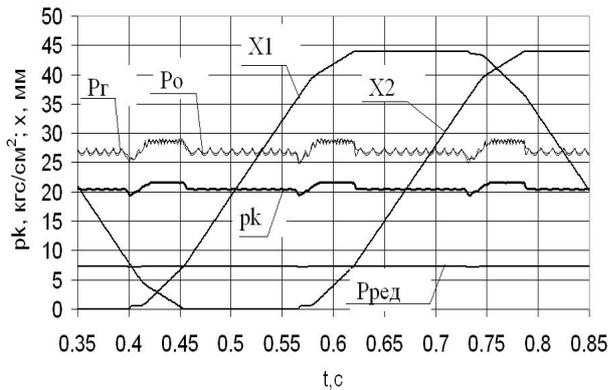


Рис. 8. Рабочий процесс ПНА, работающего в составе ЖРДУ, задресселированной по тяге до 250 кгс путём перенастройки газового редуктора, питающего ПНА.

p_r – давление на выходе из насоса горючего;
 p_o – давление на выходе из насоса окислителя;
 p_k – давление в камере сгорания;
 $p_{ред}$ – давление настройки газового редуктора, питающего ПНА;
 X_1, X_2 – хода блоков поршней.

Для реализации дросселирования ЖРДУ по тяге до 200 кгс целесообразно снизить давление надува топливных баков до $6,9 \text{ кгс/см}^2$ либо адаптировать газовые переключатели ПНА к работе при более низких давлениях, что приведёт к увеличению сопротивления по газовому тракту.

Как видно из рис. 6, 7, 8 регулирование путём перенастройки редуктора, питающего ПНА, позволяет получать более глубокие режимы дросселирования ЖРДУ по тяге, на привод ПНА расходуется меньше гелия, и нет больших перекосов выходных давлений насосов окислителя и горючего.

Регулирование тяги ЖРДУ путём изменения гидравлического сопротивления магистрали горючего, рис. 3, 4, 5 позволяет получать на режимах дросселирования минимальные пульсации давления в камере сгорания.

5. Перспективы дальнейших исследований в данном направлении

Главной задачей усовершенствования пневмонасосной системы подачи компонентов топлива является уменьшение амплитуды пульсаций выходных давлений насосов окислителя и горючего, а следовательно и тяги двигателя, при дросселировании ЖРДУ.

Выводы

1. Дросселировать ЖРДУ с ПНА по тяге, с точки зрения расходования гелия, целесообразно уменьшением выходного давления газового редуктора, питающего ПНА. Диапазон дросселирования этим способом составляет -45% при штатных входных давлениях и -55% при пониженных.

2. Дросселирование ЖРДУ с ПНА путём увеличения гидравлического сопротивления выходной магистрали насоса горючего обеспечивает минимальные пульсации давления в камере сгорания, но при таких режимах работы на привод ПНА идёт повышенный расход гелия и появляется перекоп выходных давлений насосов окислителя и горючего.

Литература

1. Вакина В.В., Денисенко И.Д., Столяров А.Л. Машиностроительная гидравлика, примеры расчётов. – К., 1987. – 256 с.
2. Логов И.Л. Пневматические насосы. – М.: Техника, 1962. – 246 с.
3. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. – М., Машиностроение, 1972 – 320 с.

Поступила в редакцию 23.04.2008

Рецензент: д-р техн. наук А.В. Климов, ГП Конструкторское бюро “Южное” им. М.К. Янгеля, Днепропетровск.