

УДК 621.454.2.046.5

А. А. Макаренко, Д. А. Удовиченко

ОТРАБОТКА ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО КЛАПАНА В КРИОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ

О проведении наземных испытаний по отработке динамики срабатывания разделительного клапана, работающего в среде жидкого кислорода.

Про проведення наземних випробувань з відпрацювання динаміки функціонування роздільного клапана, що працює в середовищі рідкого кисню.

The paper is about the ground tests to refine the action dynamics of dividing valve operating in liquid oxygen environment.

Разработка разделительного клапана окислителя для РН «Антарес» явилась новой задачей для ГП «КБ «Южное». Для функционирования разделительного клапана был разработан принципиально новый пневмопривод с гидравлическим тормозом, использующим в качестве рабочей жидкости переохлажденный кислород непосредственно из расходной магистрали.

Сложность отработки привода, работающего в условиях криогенных компонентов, заключается в большой трудоемкости работ, значительной стоимости жидкого кислорода, длительности каждого испытания с учетом необходимости создания криогенных температур, невозможности в условиях замкнутого герметичного клапана провести измерения, в полной мере характеризующие функционирование его элементов.

Для подтверждения работоспособности клапана в штатных условиях эксплуатации была разработана специальная методология наземной отработки, позволившая оптимизировать материальные и временные затраты.

Уравнения движения и определяемые параметры

Для проведения расчетов процесса срабатывания разделительного клапана была создана специальная математическая модель. Основным элементом, обеспечивающим открытие и закрытие клапана, является привод. Расчетная схема привода разделительного клапана приведена на рис. 1.

Кинематическая схема привода – механизм с одной степенью свободы, представляется в виде поршня, совершающего поступательное движение под действием управляющего давления $180 - 230 \text{ кгс/см}^2$. Движению поршня препятствуют силы трения на уплотнениях, усилие пружины, давление в гидравлическом амортизаторе и перепад давления жидкого кислорода на затворе, разделяющем две полости магистрали окислителя.

Динамика движения поршня и связанного с ним затвора описывается системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, которые включают в себя уравнения движения поршня и связанного с ним затвора, уравнения термодинамики переменной массы газа, описывающие процесс изменения параметров в управляющей полости пневмопривода и ресивере, зависимости гидравлического торможения, определяющиеся истечением жидкости из амортизирующей полости [1, 2].

Основные уравнения системы приведены ниже.

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = P_m \cdot S - F_{TP} - F_{TP} - \\ - P_{жк} \cdot S_{жк} - \Delta P_3 \cdot S_3, \\ \frac{dP_m}{dt} = \frac{k-1}{V_m} \left(\frac{k}{k-1} R \cdot T_{pec} \cdot \dot{G}_{pec} - \right. \\ \left. - \frac{k}{k-1} P_m \frac{dV_m}{dt} \right), \\ \frac{d\rho_m}{dt} = \frac{1}{V_m} \left(\dot{G}_{pec} - \rho_m \frac{dV_m}{dt} \right), \\ \frac{dV_m}{dt} = \dot{x} \cdot S_m, \\ P_{жк} = \zeta \cdot \frac{\rho_{жк} \cdot \dot{x}^2}{2} \cdot \left(\frac{S_{жк}}{S_{oms}} \right)^2, \\ \zeta = 1 + 0,5 \cdot (1 - \bar{f})^{0,75} + \\ + 1,41 \cdot (1 - \bar{f})^{0,375} \cdot \frac{1}{\bar{f}^2}, \\ \bar{f} = \frac{S_{жк}}{S_{oms}}, \end{cases}$$

где x – перемещение поршня; m – масса поршня; S – площадь поршня со стороны управляющего давления; P_m , ρ_m , V_m – давление, плотность газа, объем полости управляющего давления; $S_{жс}$ – площадь поршня со стороны жидкости (амортизирующей полости); $F_{тр}$, $F_{пр}$ – сила сопротивления (трения) и усилие пружины; ΔP_3 , S_3 – перепад давле-

ния и площадь затвора; k , R – показатель адиабаты и газовая постоянная в управляющей полости; $T_{рес}$, $G_{рес}$ – температура газа в ресивере и величина массового расхода; ζ – коэффициент гидравлического сопротивления; $\rho_ж$ – плотность жидкости; $S_{отв}$ – площадь отверстий для выхода жидкости из амортизирующей полости.

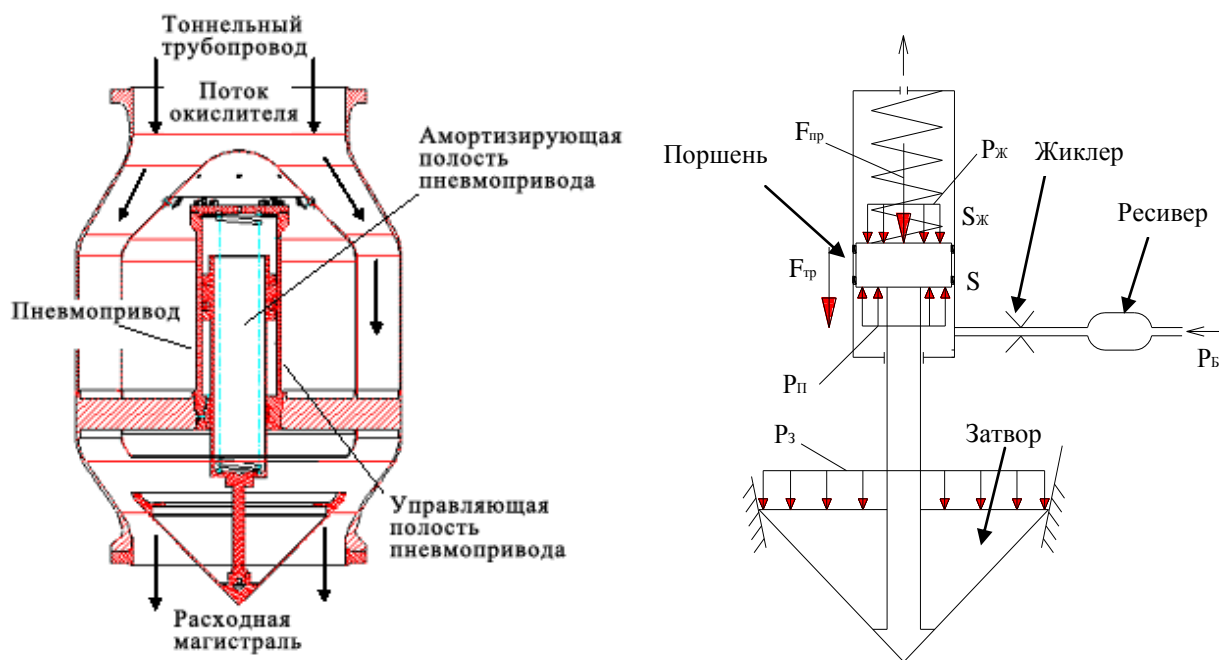


Рис. 1. Схема привода разделительного клапана

К числу параметров, которые необходимо уточнить или определить в процессе наземной отработки относятся такие, например, как силы сопротивления в приводе, зависящие от давления, коэффициенты гидравлического сопротивления, эффективная площадь жиклеров и т.д.

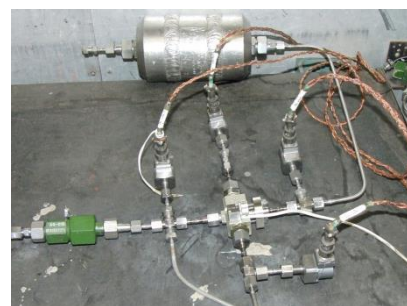
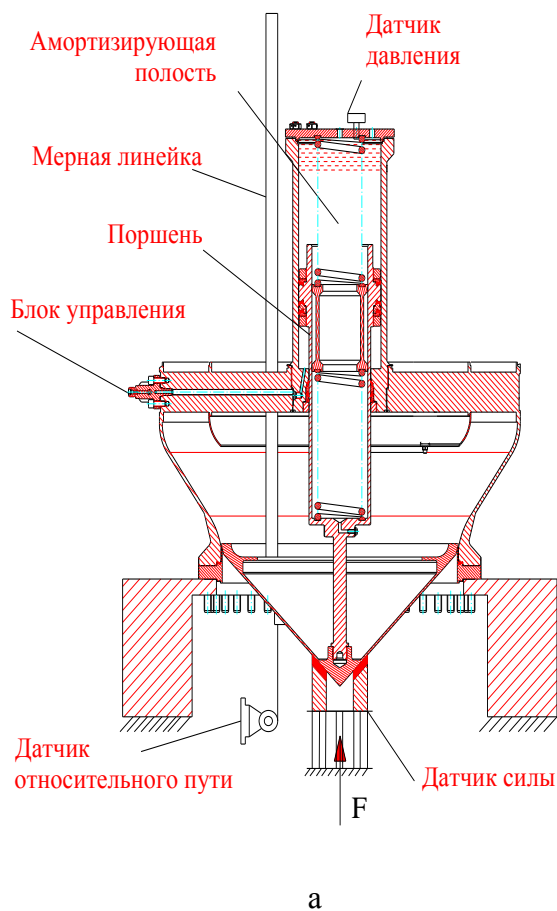
Отработка функционирования разделительного клапана проводилась в два этапа:

- отработка разделительного клапана в нормальных условиях с использованием в качестве рабочей жидкости обычной воды;
- отработка разделительного клапана в условиях применения криогенных компонентов (кислород и азот).

Отработка привода в нормальных условиях на воде

Основными задачами, решаемыми в процессе испытаний на воде, были:

- подтверждение работоспособности механизма открытия-закрытия клапана;
- определение усилия начала движения затвора (страгивания) при различных усилиях начального прижатия;
- оценка эффективности применения жиклеров в газовой магистрали управления клапаном;
- определение кинематических параметров механизма открытия-закрытия клапана (скоростей, перемещений и времени) при различных режимах работы клапана;
- определение давления «самозакрытия» пневмопривода.



б



в

Рис. 2. Схемы испытаний:

- а – схема опытной конструкции; б – фото опытной конструкции испытаний блока управления;
в – фото опытной конструкции испытаний по определению сил трения привода, коэффициента гидравлического сопротивления привода

Испытания клапана проводились в несколько этапов с разделением решаемых задач.

Для отработки блока управления клапаном были проведены испытания на отдельной подборке (рис. 2, б) с подтверждением его герметичности, определением давления открытия и закрытия клапанов блока управления, подтверждением ресурса.

Применение открытого корпуса клапана (рис. 2, а, в) и полностью собранного клапана (рис. 5, б) позволило в процессе испытаний наблюдать визуально непосредственно за функционированием отдельных элементов клапана, провести измерения перемещения

поршня, давления в управляющей и амортизирующей полостях и определить требуемые параметры функционирования привода:

– коэффициенты сопротивления в магистрали управляющего давления и выбор требуемого жиклера, обеспечивающего конечную скорость поршня в условиях цеховых испытаний (без заполнения клапана жидкостью) не более 2 м/с (рис. 4, б);

– определение сил трения уплотнительных манжет при различных значениях давления в управляющей и амортизирующих полостях и усилий страгивания затвора (рис. 4, а);

– определение коэффициента гидравлического сопротивления тормоза с уточнением

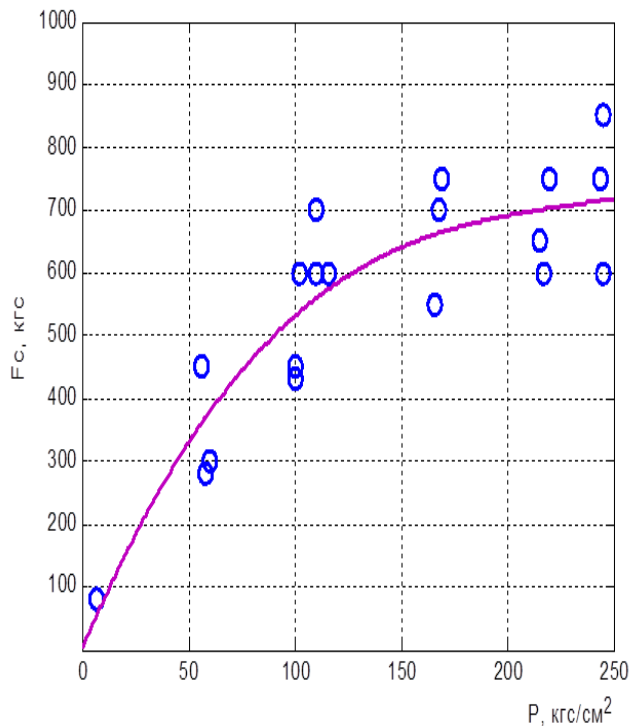
диаметра и количества отверстий, достаточных для создания требуемых сил гидравлического сопротивления и обеспечивающих заполняемость амортизирующей полости жидкостью при заправке клапана (рис. 5, табл. 1).

В процессе испытаний измерялись давления в управляющей полости и полости гидравлического амортизатора, перемещения поршня привода (при помощи датчика относительного пути и системы видеоизмерений), усилия выдвигания поршня, момент открытия затвора (при помощи контактного датчика).

Таблица 1

Результаты испытаний гидравлического амортизатора

Количество отверстий	Эквивалентный диаметр, мм	Время открытия клапана, с	Коэффициент гидравлического сопротивления ζ	
			эксперимент	расчет
2	7	1,73 – 1,84	$4,5 \cdot 10^5$	$4,65 \cdot 10^5$
3	8,7	1,37	$2,1 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^5$	$1,95 \cdot 10^5$
5	11,2	1,01	$0,66 \cdot 10^5 - 0,82 \cdot 10^5$	$0,7 \cdot 10^5$



а

Было проведено 180 испытаний клапана в нормальных условиях. По результатам испытаний была проведена оценка корректности

расчетной модели функционирования привода. На рис. 3 приведены графики перемещения и скорости привода, полученные расчетным и экспериментальным путем. Видно хорошее совпадение результатов.

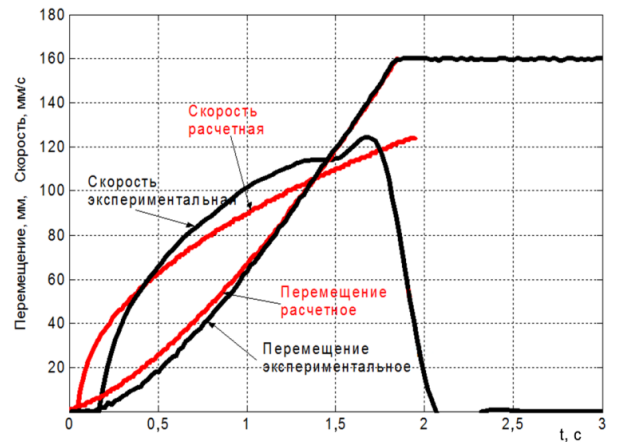
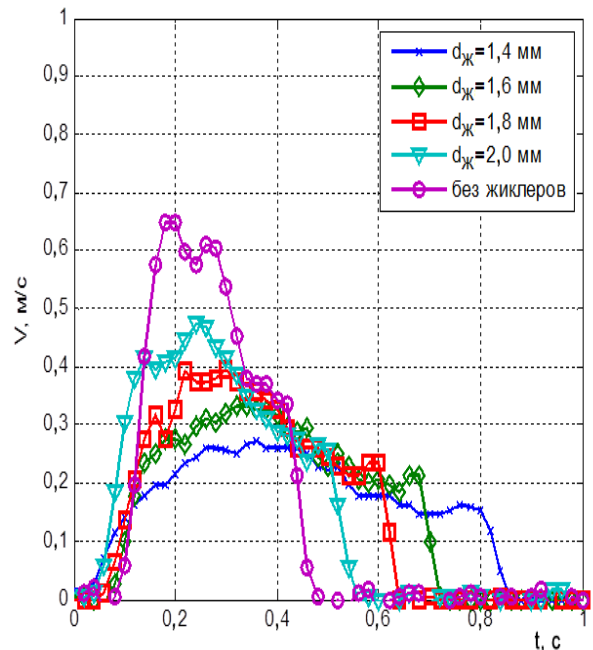
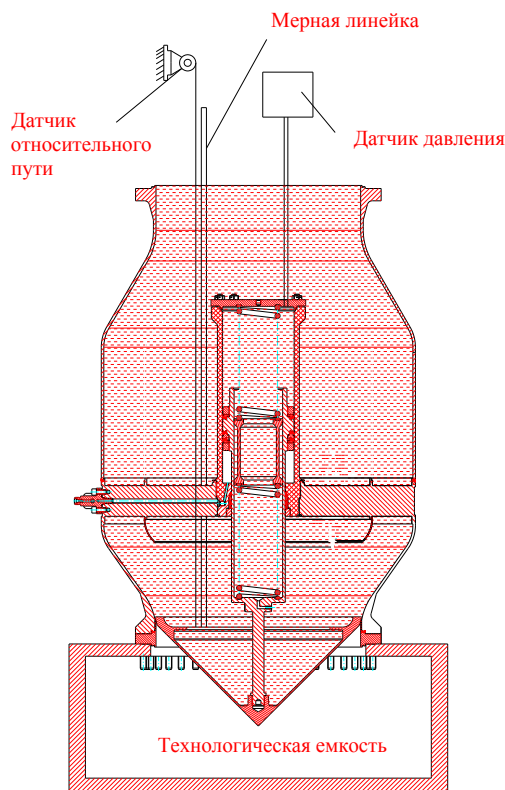


Рис. 3. Графики перемещения и скорости привода



б

Рис. 4. Графики с результатами испытаний привода:
а – зависимость силы сопротивления уплотнительных манжет от давления; б – зависимость скорости перемещения поршня привода от диаметра жиклера $d_{ж}$ в магистрали управляющего давления



а

б

Рис. 5. Испытания по отработке гидравлического амортизатора:
а – схема испытаний; б – фото испытаний

Отработка разделительного клапана в условиях криогенных компонентов

Испытания клапана с применением криогенных жидкостей не позволили провести такой же объем измерений, как на предыдущем этапе.

Для анализа функционирования клапана использовали результаты измерений давления в управляющей полости и полостях клапана над затвором и под затвором, показания контактного датчика и датчиков виброускорений, установленных на корпусе клапана. Проведенные ранее испытания на воде позволили довольно корректно использовать

этот ограниченный объем измерений и определять картину работы клапана.

В процессе испытаний на криогенных компонентах проводилось уточнение параметров работы гидравлического тормоза с учетом изменения характеристик рабочей жидкости, подтверждение работоспособности клапана с учетом особенностей работы в криогенных условиях, подтверждение его ресурса.

В условиях штатной работы разделительный клапан заполняется переохлажденным жидким кислородом. Так как в наземных условиях проведение испытаний на пере-

охлажденном кислороде очень дорого, то испытания разделительного клапана проводились в двух средах:

– на жидком азоте, имеющем температуру, близкую к температуре переохлажденного кислорода (проведено более 360 испытаний);

– на жидком кислороде, на этих испытаниях оценивалась особенность работы в кислородной среде и подтверждались ранее полученные данные (проведено 10 испытаний).

Испытания с криогенными компонентами подтвердили работоспособность клапана и стабильность работы в разных условиях, надежность его функционирования с учетом возможной негерметичности уплотнительных манжет, особенностей заливки амортизирующей полости жидким компонентом.

На рис. 6 приведены сравнительные графики изменения давления в управляющей полости, полученные в процессе испытаний разделительного клапана, для случаев гидравлического торможения и его отсутствия и

для различных значений перепада давления на затворе. В табл. 2 приведено время открытия клапана в разных условиях. Полученные данные подтверждают эффективность работы гидравлического тормоза.

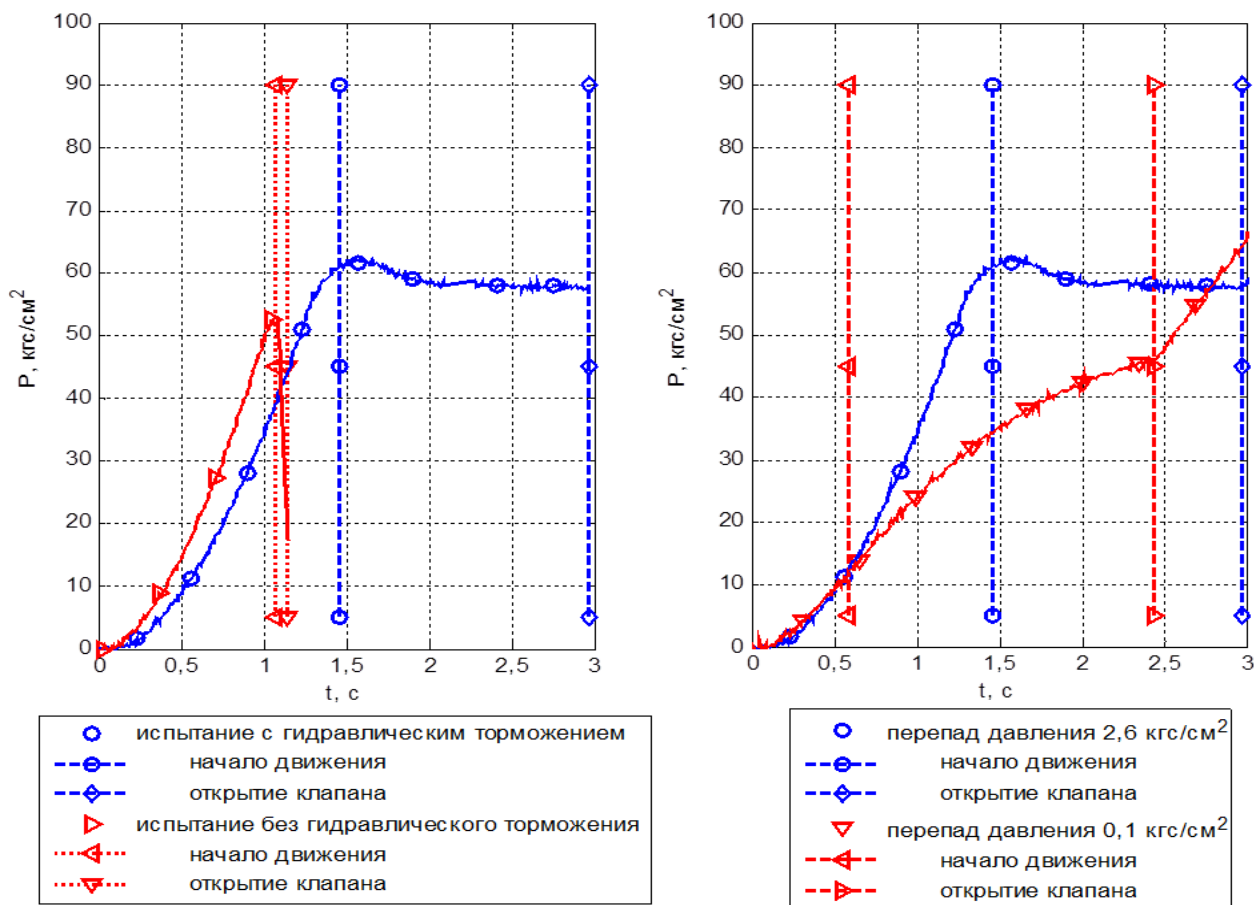
Таблица 2

Время открытия клапана
в условиях испытаний

Перепад давления	Время открытия (от начала движения), с		
	вода	азот	кислород
0,1	1,84	1,96	2,5
2,6	-	1,69	1,72
5,0	-	1,35	1,54

Математическая модель работы привода, уточненная в процессе испытаний клапана в нормальных и криогенных условиях, позволяет анализировать результаты испытаний и подтверждать работоспособность клапана в штатных условиях.

Проведенный комплекс работ по наземной отработке позволил с минимальными затратами подтвердить работоспособность привода разделительного клапана окислителя.



а б
 Рис. 6. Графики давления в управляющей полости, полученные в процессе испытаний с использованием жидкого азота:

а – сравнение результатов испытаний с гидравлическим торможением и без него; б – сравнение результатов испытаний для разного перепада давления на затворе клапана

Заключение

Разработанная математическая модель привода, методики испытаний позволяют вести расчеты, разработку и отработку разделительных клапанов, работающих как на криогенных компонентах топлива, так и на высококипящих. Впервые на ГП «КБ «Южное» проведен комплекс расчетных, проектных, экспериментальных работ и разработан новый разделительный клапан с пневмоприводом и гидротормозом, работающий на жид-

ком переохлажденном кислороде, поступающем из расходной магистрали окислителя.

Список использованной литературы

1. Термодинамика и теплопередача/ А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щукин. – М.: Высш. шк., 1964. – 458 с.
2. Термодинамика переменного количества газа/ Под ред. Н. М. Беляева. – Днепропетровск: ДГУ, 1981. – 110 с.

Статья поступила 08.09.2017