

Канд. техн. наук Г. Л. Поздеев,  
А. Е. Гамаза

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СЛИВА ВЫСОКОКИПЯЩИХ КОМПОНЕНТОВ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА ИЗ СРЕДСТВ ДОСТАВКИ В ЗАПРАВОЧНУЮ ЕМКОСТЬ НА ЗАКРЫТЫЙ ДРЕНАЖ

*Приведены изменения параметров парогазовой смеси высококипящих компонентов ракетного топлива в заправочной емкости в процессе слива в нее компонента ракетного топлива на закрытый дренаж в зависимости от коэффициента заполнения емкости и начальных параметров среды в ней.*

*Наведено зміни параметрів парогазової суміші висококиплячих компонентів ракетного палива в заправній ємкості в процесі зливу в неї компонента ракетного палива на закритий дренаж залежно від коефіцієнта заповнення ємкості та початкових параметрів середовища в ній.*

*The paper presents the variation of parameters of gas-vapor mixture of hypergolic rocket propellant components in a filling tank in the process of rocket propellant components filling into it with "closed drainage" depending on tank filling coefficient and initial parameters of environment in the tank.*

Транспортировка на космодром высококипящих компонентов ракетного топлива (КРТ) (окислитель – тетроксид диазота и горючее – несимметричный диметилгидразин) проводится в специальных контейнерах-цистернах (КЦ), конструкция которых позволяет создавать в них рабочее давление до 7 кгс/см<sup>2</sup>. После доставки на космодром проводится слив заданного количества КРТ из КЦ в заправочную емкость. Известны и используются несколько способов слива КРТ: насосный, самотеком, выдавливанием [1, 2].

Для слива КРТ из КЦ в емкости систем заправки наиболее часто применяемым на практике является способ слива выдавливанием на открытый дренаж (с отводом паров КРТ из емкости). Однако при этом образуется большое количество дренируемых паров КРТ, которые необходимо утилизировать. Альтернативным способом слива

КРТ может быть слив выдавливанием на закрытый дренаж (без отвода паров КРТ из емкости в процессе слива). При сливе в заправочную емкость объемом  $V_0$  КРТ объемом  $V_{зс} = 0,8V_0$  на открытый и закрытый дренаж масса паров КРТ, дренируемых из емкости (при сливе КРТ на открытый дренаж), превышает массу паров КРТ, оставшихся в емкости (при сливе на закрытый дренаж), в четыре раза. Данный вопрос особенно актуален при сливе окислителя – тетроксид диазота. Таким образом, целесообразно более подробно рассмотреть особенности слива КРТ на закрытый дренаж.

Схематически технология слива КРТ из КЦ в заправочную емкость может быть проиллюстрирована на примере пневмогидравлической схемы (рис. 1).

До начала слива КРТ из КЦ в заправочной емкости 4 в общем случае могут находиться несливаемые остатки КРТ. Избыточное давление в емкости составляет 0,5...1,0 кгс/см<sup>2</sup>.

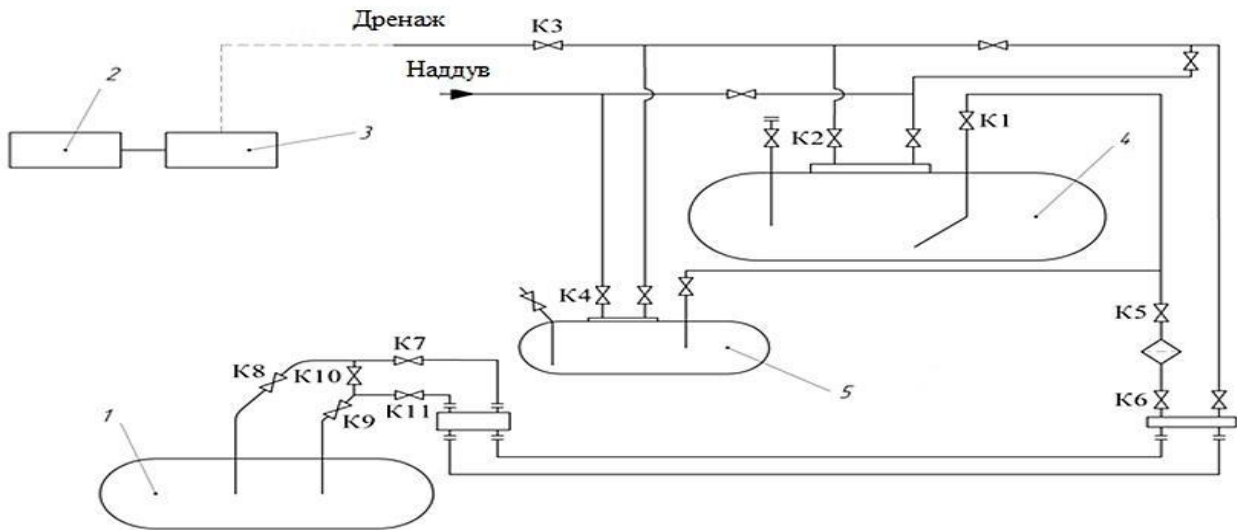


Рис. 1. Пневмогидравлическая схема слива КРТ:

1 – контейнер-цистерна; 2 – агрегат нейтрализации паров и промстоков; 3 – емкость сбора паров ССНПП; 4 – заправочная емкость; 5 – сливная емкость; К – клапаны

Для слива:

- проводится дренирование избыточного давления парогазовой смеси из емкости 4 в емкость 3 ССНПП (системы сбора и нейтрализации паров и промстоков) с последующей утилизацией паров КРТ в агрегате 2, создается атмосферное давление в емкости 4;
- проводится наддув резервуара КЦ до давления выдавливания  $\sim 3 \text{ кгс/см}^2$  (принимается из опыта);
- открываются сливные клапаны КЦ 1 и заправочной емкости 4 (дренажный клапан заправочной емкости К2 закрыт). Проводится слив заданного количества КРТ из КЦ в емкость 4. Фиксируется непрерывное увеличение давления  $P_i$  в газовом объеме емкости 4;
- прекращается слив КРТ при достижении заданного уровня КРТ в заправочной емкости (обычно  $V_{жс} = 0,8V_0$ ), при этом закрываются сливные клапаны КЦ и заправочной емкости. Значение  $P_i$  является суммой парциальных давлений газа  $P_{Г_i}$  и насыщенных паров КРТ  $P_{S_i}$  в газовом объеме емкости в  $i$ -тый момент слива:

$$P_i = P_{Г_i} + P_{S_i} \quad (1)$$

Необходимым условием реализации слива КРТ выдавливанием является наличие разности давлений в КЦ и заправочной емкости:

$$P_{кц} - P_i > 0. \quad (2)$$

Принято, что для завершения слива КРТ должна обеспечиваться разность давлений в КЦ и заправочной емкости согласно условию

$$\Delta P = P_{кц} - P_{i_k} = 0,5, \quad (3)$$

где  $P_{i_k}$  – давление в заправочной емкости на момент окончания слива КРТ.

Значение  $\Delta P$  уточняется в каждом отдельном случае для конкретного гидравлического сопротивления системы с учетом гидростатического напора.

Учитывая, что начальное давление  $P_0$  в емкости равно атмосферному и парциальное давление паров КРТ в емкости (при наличии в емкости жидкой фазы КРТ) является однозначной функцией температуры КРТ ( $P_S = f(t)$ ), начальное значение парциального давления газа

$$P_{Г_0} = P_0 - P_{S_0}, \quad (4)$$

где  $P_{S_n}$  – парциальное давление паров КРТ при начальной температуре среды в емкости.

Поскольку в общем случае температура сливаемого КРТ не совпадает с начальной температурой среды в емкости  $t_0$ , текущая температура среды  $t_s$  будет изменяться в процессе слива. Как показали оценки [3], в силу высокой теплоемкости КРТ и малого количества несливаемых его остатков в емкости температура среды в заполняемой емкости достаточно быстро стабилизируется и становится равной температуре сливаемого КРТ  $t_k$  (в период заливки КРТ в объеме  $0,1 \dots 0,2V_0$ ).

Тогда можно принять следующие допущения:

1) парциальное давление газа в свободном объеме заполняемой емкости будет изменяться по изотермическому закону;

2) парциальное давление паров КРТ в свободном объеме заполняемой емкости будет постоянным значением, равным давлению насыщенных паров КРТ  $P_{S_k}$  при температуре  $t_k$ ;

3) избыточное количество паров КРТ в емкости в процессе слива КРТ будет постоянно конденсироваться в свободном объеме емкости.

Следовательно, реализуется условие

$$P_{S_i} = P_{S_k}.$$

С учетом допущения 1 для газа справедливо равенство

$$P_{G_0}V_0 = P_{G_i}V_i, \quad (5)$$

где  $P_{G_0}$  – начальное парциальное давление газа в заправочной емкости;

$V_0$  – геометрический объем заправочной емкости;

$P_{G_i}$  – текущее значение парциального давления газа в заправочной емкости;

$V_i$  – текущее значение свободного объема заправочной емкости.

Поскольку  $V_i = V_0 - V_{ж_i}$ , где  $V_{ж_i}$  – объем слитого КРТ в  $i$ -тый момент слива, то из выражения (5) следует

$$P_{G_i} = P_{G_0} \left( \frac{1}{1 - \frac{V_{ж_i}}{V_0}} \right), \quad (6)$$

где  $V_{ж_i}/V_0$  – коэффициент заполнения емкости  $K_j$ .

В общем случае  $K_j$  при сливе может изменяться в пределах  $0 \dots 1$ . Так как заправочную емкость заполняют объемом КРТ  $\leq 0,8 V_0$ , то  $K_j^{\max} = 0,8$ .

С учетом (4), (6) уравнение (1) может быть записано в следующем виде:

$$P_i = (P_0 - P_{S_n}) \left( \frac{1}{1 - K_i} \right) + P_{S_k}. \quad (7)$$

Уравнение (7) является основным выражением, описывающим состояние парогазовой среды в емкости при заливке КРТ на закрытый дренаж.

Поскольку ранее было принято, что давление выдавливания КРТ из КЦ равно  $3 \text{ кгс/см}^2$  ( $4 \text{ кгс/см}^2$  абс.), то с учетом реализации условия (3) давление в заполняемой емкости не должно превышать  $3,5 \text{ кгс/см}^2$  абс.

Из выражения (7) следует, что максимальное значение  $P_i$  для любого значения  $K_i$  достигается при минимальном значении  $P_{S_n}$  (при минимальной температуре начального состава среды в заполняемой емкости) и максимальном значении  $P_{S_k}$  (при максимальной температуре сливаемого КРТ).

Значения  $P_{S_H}$ ,  $P_{S_K}$ ,  $P_0 - P_{S_H}$  для окислителя и горючего в диапазоне температур 5...35 °C приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров парогазовой среды в заполняемой емкости

t, °C	Окислитель		Горючее	
	$P_{S_H} (P_{S_K})$ , кгс/см <sup>2</sup>	$P_0 - P_{S_H}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$P_{S_H} (P_{S_K})$ , кгс/см <sup>2</sup>	$P_0 - P_{S_H}$ , кгс/см <sup>2</sup>
5	0,47	0,53	0,075	0,925
10	0,60	0,40	0,099	0,901
15	0,78	0,22	0,129	0,87
20	0,98	0,02	0,167	0,833
30	1,53	0	0,273	0,727
35	1,9	0	0,346	0,654

Из уравнения (7) можно получить значение  $P_{i_k}^{max}$  при крайних значениях входящих в него параметров:

$$P_{i_k}^{max} = (P_0 - P_{S_H}) \left( \frac{1}{1 - K_i^{max}} \right) + P_{S_K}. \quad (8)$$

Результаты расчетов значений  $P_{i_k}^{max}$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

Максимальные значения давления в заполняемой емкости

Параметр	Компонент топлива	
	Окислитель	Горючее
$P_{S_H}$ , кгс/см <sup>2</sup>	0,47	0,075
$P_{S_K}$ , кгс/см <sup>2</sup>	1,53	0,273
$K_i$	0,8	0,8
$P_{i_k}^{max}$ , кгс/см <sup>2</sup> абс.	4,2	4,9

Таким образом, при определенных неблагоприятных условиях слив КРТ в запорную емкость на закрытый дренаж может

быть выполнен лишь частично до получения значения  $K_i^{дост}$  согласно уравнению

$$P_{i_k}^{зад} = (P_0 - P_{S_H}) \left( \frac{1}{1 - K_i^{дост}} \right) + P_{S_K}, \quad (9)$$

где  $P_{i_k}^{зад}$  – заданное максимальное значение давления в емкости (3,5 кгс/см<sup>2</sup>);

$K_i^{дост}$  – достигаемый коэффициент заполнения емкости.

Из уравнения (9) следует

$$K_i^{дост} = 1 - \frac{P_0 - P_{S_H}}{P_{i_k}^{зад} - P_{S_K}}. \quad (10)$$

Для параметров  $P_{S_H}$ ,  $P_{S_K}$ , приведенных в табл. 1, значение  $K_i^{дост}$  составит 0,73 для окислителя, 0,71 для горючего.

Таким образом, при сливе КРТ в запорную емкость на закрытый дренаж для заданных условий слива может быть обеспечено заполнение КРТ свыше 70 % объема емкости. При увеличении значений  $P_{S_H}$ ,  $P_{i_k}^{зад}$  и уменьшении значения  $P_{S_K}$  значение  $K_i^{дост}$  может достигать 0,8V<sub>0</sub> и выше. При уменьшении значений  $P_{S_H}$ ,  $P_{i_k}^{зад}$  и увеличении значения  $P_{S_K}$  значение  $K_i^{дост}$  снижается.

На основании уравнений (9), (10) можно записать

$$P_{i_k}^{max} - P_{i_k}^{зад} = (P_0 - P_{S_H}) \left[ \left( \frac{1}{1 - K_{i_1}} \right) - \left( \frac{1}{1 - K_{i_2}} \right) \right], \quad (11)$$

где  $K_{i_1}$  – коэффициент заполнения емкости, при котором после слива КРТ объемом  $V_{ж}$  достигается избыточное давление  $P_{i_k}^{max}$  (табл. 2);

$K_{i_2}$  – коэффициент заполнения емкости, при котором после слива КРТ объемом  $V_{ж}$  достигается избыточное давление  $P_{i_k}^{зад}$ .

Поскольку разности  $P_{i_k}^{max} - P_{i_k}^{зад} > 0$ ,  $P_0 - P_{S_H} > 0$ , то должно быть реализовано условие

$$K_{i_1} > K_{i_2}; \quad \frac{V_{ж}}{V_1} > \frac{V_{ж}}{V_2}; \quad V_2 > V_1.$$

Из этого следует, что в случае, если при начальных параметрах среды в емкости и температуре сливаемого КРТ для значений  $K_i = 0,8$  не обеспечивается желаемый перепад давления между КЦ и емкостью, необходимо увеличить свободный объем емкости, например сообщить между собой свободные объемы заполняемой и дополнительной емкостей. Объем дополнительной емкости определяется из уравнения (11) и составляет ~10 % объема заполняемой емкости  $V_2 \cong 1,1V_1$  для систем окислителя и горючего. В системах заправки всегда предусматривается сливная емкость, объем которой обычно составляет 0,1...0,2 объема заправочной. Следовательно, в качестве дополнительной емкости может использоваться сливная емкость системы заправки, которая в операции слива КРТ в заправочную емкость из КЦ задействуется только в заключительных процедурах. Дополнительная емкость может подключаться в начальный период слива, но в этом случае в ее объем будет вытеснено значительное количество паров КРТ, которые в дальнейшем должны быть утилизированы. Поэтому предпочтительно подключать дополнительную емкость в момент, когда при заполнении заправочной емкости в ней достигается заданное давление  $P_i^{зад}$ . Как было показано ранее, в заправочную емкость будут слиты окислитель объемом  $V_{ж}^0 = 0,73V_0$ , горючее объемом  $V_{ж}^r = 0,71V_0$ , при этом ~2/3 испарившихся паров КРТ конденсируется внутри емкости, т.е. не требуют утилизации.

На рис. 2 представлен график изменения давления в заправочной емкости окислителя при заполнении ее КРТ на закрытый дренаж с подключением дополнительной емкости на заключительном этапе слива КРТ. Для построения графика  $P_i = f(K_i)$  использовалась зависимость (7). График изменения давления в заправочной емкости горючего при сливе в нее КРТ будет аналогичен графику рис. 2.

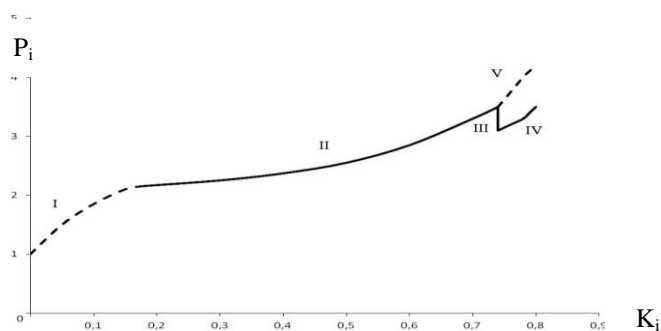


Рис. 2. График  $P_i = f(K_i)$

На графике рис. 2 может быть выделено пять участков:

I – условный участок, на котором происходит восстановление паров КРТ до значения давления насыщенных паров сливаемого КРТ  $P_{s_k}$ ;

II – участок изменения давления в заправочной емкости при сливе в нее КРТ на закрытый дренаж;

III – участок, соответствующий подключению к свободному объему заправочной емкости дополнительной емкости;

IV – участок изменения давления в заправочной емкости с подключенной к ней дополнительной емкостью;

V – условный участок, иллюстрирующий изменение давления в заправочной емкости при сливе в нее КРТ объемом  $0,8V_0$ .

Из графика видно, что без подключения дополнительной емкости слив КРТ может быть завершён только при давлении в КЦ более  $5,0 \text{ кгс/см}^2$  изб., что противоречит принятым условиям слива.

## Выводы

В статье рассмотрены вопросы изменения параметров парогазовой смеси окислителя АТ и горючего НДМГ в заправочной емкости системы заправки в процессе слива в нее КРТ выдавливанием на закрытый дренаж в зависимости от коэффициента заполнения емкости, начальных параметров среды в ней и температуры сливаемого КРТ. Показана возможность слива КРТ в заправочную емкость на закрытый дренаж с заполнением свыше 70% ее объема.

## Список использованной литературы

1. Космодром / Под общ. ред. А. П. Вольского. – М.: Изд-во МО СССР, 1977.
2. Бережковский М. И. Хранение и транспортировка химических продуктов. – М.: Химия, 1973.
3. Выбор и обоснование технологии слива компонентов ракетных топлив из контейнеров цистерн в емкости СЗО, СЗГ: Техн. справка "Циклон-4" 22.6840.155 СТ. – ГП "КБ "Южное", 2005.

Статья поступила 12.12.2016