

Канд. техн. наук Г. Л. Поздєєв, С. Е. Літай

ЗАПРАВНО-НЕЙТРАЛІЗАЦІЙНА СТАНЦІЯ. НОВІ РОЗРОБКИ ТА АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ

Стаття висвітлює розроблення та дослідження багатофункціональних операцій під час підготування компонентів палива до заправлення баків ракети-носія висококиплячими компонентами палива в умовах заправно-нейтралізаційної станції. Розглянуто питання підготування палива до заправлення ступенів ракети-носія висококиплячими компонентами палива тетроксид діазоту (окиснювач) та несиметричний диметилгідразин (пальне) в частині геліювання та деазотування палива. Зазвичай ці питання належать до єдиної технології підготування палива, і їх вирішують послідовно: спочатку паливо зливається в заправний резервуар системи заправлення, а потім деазотується, наприклад, продуванням гелієм за атмосферного тиску в резервуарі, потім гелюється (насиченим гелієм) до заданої концентрації барботуванням гелію в паливі з підтриманням заданого тиску гелію в резервуарі. Така технологія істотно ускладнює процес підготування палива, збільшуються витрати гелію, а також збільшується кількість генеруючої пари палива, що потребує утилізації в агрегатах нейтралізації. У цій статті розроблено та досліджено multifunkціональні операції, за яких одночасно виконується зливання палива із засобів доставляння, геліювання та деазотування. Розраховано кількість надлишкового азоту в паливі та основні напрямки глибокого деазотування, визначено кількість генеруючої пари та кількість потрібного гелію, досліджено процес зливання палива видавлюванням з підтриманням заданого тиску в резервуарі чергуванням зливання палива при закритому дренажі (підвищення тиску в резервуарі) та при відкритому дренажі (зниження тиску в резервуарі). Подано теоретичне обґрунтування застосування на практиці multifunkціональних операцій під час підготування висококиплячих палив до заправлення ступенів ракети-носія.

Ключові слова: геліювання та деазотування палива, зливання при закритому дренажі, дренавання надлишковим тиском, паргазова суміш, система нейтралізації.

The article dwells on development and study of the multifunctional operations while preparing propellant components for launch vehicle tank filling by high-boiling propellant components at the neutralization stations. The article considers the preparation of propellant for filling the launch vehicle stages with high-boiling propellant components of nitrogen tetroxide (oxidizer) and unsymmetrical dimethyl hydrazine (fuel) in terms of propellant saturation with helium and denitrogenation. Usually these issues refer to the common technology of propellant preparation and are tackled sequentially: first, propellant is drained into the filling tank of the filling system, then the propellant is denitrogenated, for example purging the propellant by helium under atmospheric pressure in the tank, then propellant is saturated with helium to the given concentration by bubbling helium in the propellant, maintaining the set pressure of helium in the tank. This technology significantly complicates the process of propellant preparation, increases helium consumption, as well as the amount of the generated vapor, which requires recycling in the neutralization units.

This article studies multifunctional operations, where the propellant is simultaneously drained from delivery vehicles, saturated with helium and denitrogenated. Amount of residual nitrogen in the propellant and the main direction of deep denitrogenation of the propellant are calculated. Amount of generated vapor and consumed helium are determined. The process of propellant draining by extrusion, maintaining the given pressure in the tank and alternating the propellant drain on the closed vent device (compression) and open vent device (decompression) is studied.

As a result, the theoretical justification of multifunctional operations in preparation of high-boiling propellant components to fill the launch-vehicle stages is presented.

Key words: saturation with helium and denitrogenation of the propellant, drain with closed vent device, excessive pressure draining, gas-vapor mixture, neutralization system.

Вступ

Ця стаття є продовженням та розвитком теми постачання та підготування палива, розглянутої в [1]. Наведену роботу було присвячено питанням транспортування палива на космодром з відповідним насиченням гелієм, у ній обґрунтовано необхід-

ність наступної підготовки палива вже на космодромі щодо корегування досягнутого геліювання та деазотування палива.

Проаналізовано пневмогідравлічну схему зливання палива з контейнер-цистерн (КЦ) у заправний резервуар системи заправлення шляхом видавлювання палива із КЦ. Заданий тиск у заправному резервуарі

підтримується шляхом почергового зливання палива спочатку при закритому дренажі з підняттям тиску в резервуарі до допустимого, а потім при відкритому дренажі з дренуванням тиску з резервуара до початкового значення.

Схожу схему підтримання тиску в баку ракети використовували для заправки бойових ракет Р-36М і Р-36М УТТХ, її розглянуто в дисертаційній роботі [2].

Технологія зливання палива з транспортних засобів у заправному резервуарі

Спрощену пневмогідрравлічну схему зливання палива подано на рис. 1, вона є фрагментом схеми заправки ступеня РН «Циклон-4М» [3]. На схемі КЦ через щит зливу з'єднано зі зливною та дренажною магістралями заправного резервуара системи заправки, при цьому дренажну магістраль одночасно з'єднано з системою нейтралізації пари та промислових стоків. Наддування КЦ та заправної системи може виконуватися гелієм та азотом від системи газозабезпечення. Зливання палива з КЦ виконується видавлюванням. Оскільки розглянуто випадки до-

ставлення палива, насиченого гелієм, то КЦ наддувається гелієм до тиску видавлювання ($P_{\text{вид}}$), заправний резервуар також наддувається гелієм до тиску насиченого палива ($P_{\text{н}}$) за умови що $P_{\text{вид}} > P_{\text{н}}$. Відкриваються відповідні клапани, і паливо потрапляє в заправний резервуар через розпилювальний пристрій при закритому дренажі, розпилюючись у вільному об'ємі резервуара. Тиск у заправному резервуарі підвищується до значення, наприклад, $P_{\text{max}} = (P_{\text{н}} + 0,5)$ кгс/см², після чого в процесі зливання відкривається дренажний клапан на резервуарі, і тиск знижується до значення $P_{\text{min}} = P_{\text{н}}$. Об'єм палива в КЦ та заправному резервуарі системи заправки контролюють за датчиками рівня. Після досягнення заданого об'єму палива в заправному резервуарі зливання припиняється, при цьому закриваються клапани КЦ та заправного резервуара. Корегується тиск у заправному резервуарі. Виконується зливання палива зі зливних магістралей, продування магістралей, дренування надлишкового тиску зі зливних магістралей. Усі клапани КЦ та заправного резервуара закриваються.

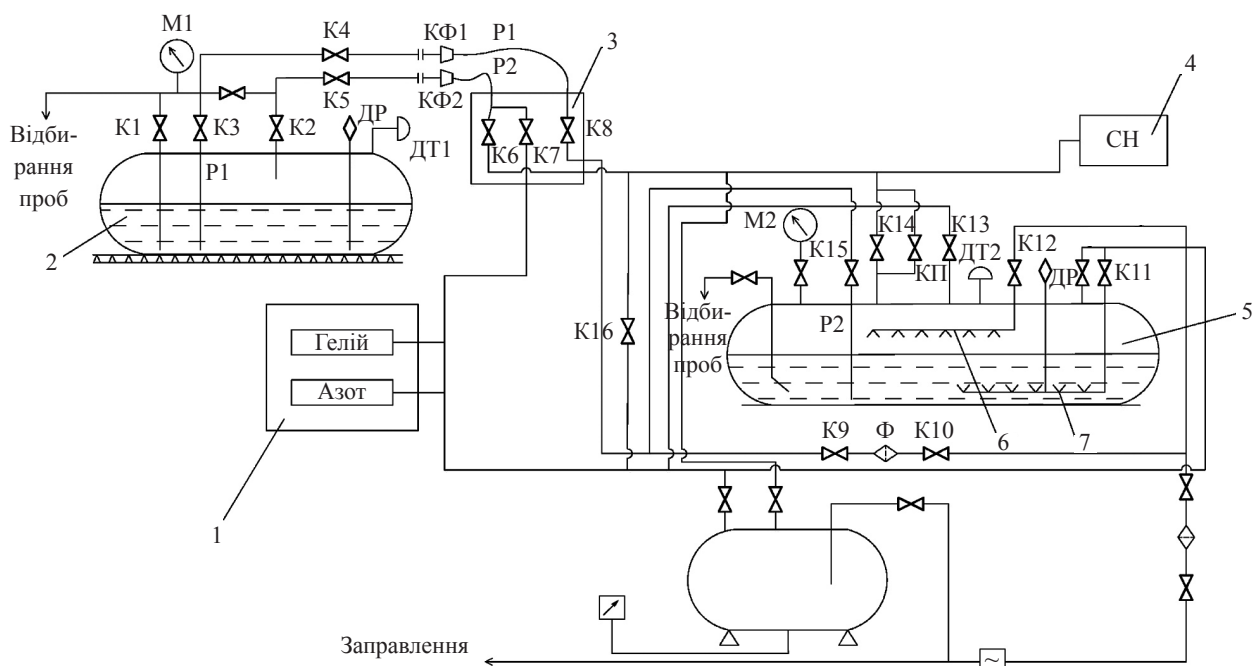


Рис. 1. Спрощена пневмогідрравлічна схема зливання палива:

- 1 – система газозабезпечення; 2 – контейнер-цистерна; 3 – щит зливу; 4 – система нейтралізації;
- 5 – заправний резервуар; 6 – барботажний пристрій; 7 – розпилювач; P1 – зливний рукав;
- P2 – дренажний рукав; K1...K16 – клапани; Ф – фільтр; КФ1, КФ2 – конфузори;
- M1, M2 – манометри; ДТ1, ДТ2 – датчики тиску; ДР – датчики рівня

Для такої технології зливання характерні такі особливості:

– температура палива під час зливання залишається постійною як під час зливання при закритому дренажі, так і під час дренажування парогазової суміші з резервуара;

– під час зливання при закритому дренажі підвищення тиску в резервуарі відбувається лише за рахунок зростання парціального тиску газу (гелію), парціальний тиск пари палива залишається постійним і дорівнює тиску насиченої пари;

– під час зливання з одночасним дренажуванням парогазової суміші з резервуара тиск у вільному об'ємі резервуара не змінюється і становить величину $P_s = \text{const}$;

– густина дренажуваної парогазової суміші ρ_{sp} дорівнює густині насиченої пари палива ρ_{ns} , густиною газу (гелію) нехтуємо $\rho_{sp} = \rho_{ns}$;

– зниження тиску в заправному резервуарі під час дренажування парогазової суміші з нього відбувається лише за рахунок зниження маси гелію.

Визначення кількості циклів підвищення – зниження тиску в резервуарі під час зливання палива

Об'єм злитого в резервуар палива і кількість циклів змінення тиску в ньому зв'язані системою рівнянь

$$V_i = \frac{P_{\min \Gamma}}{P_{\max \Gamma}} V_{i-1}; \quad (1)$$

$$\Delta V_i = V_{i-1} - V_i; \quad (2)$$

$$v_i = \sum_{i=1}^n \Delta V_i, \quad (3)$$

де $P_{\min \Gamma}$ – парціальний тиск гелію, що відповідає початку зливання при закритому дренажі ($P_{\min \Gamma} = P_n$); $P_{\max \Gamma}$ – парціальний тиск гелію, що відповідає початку дренажування парогазового середовища суміші з резервуара $P_{\max} = (P_{\min} + 0,5) \text{ кгс/см}^2$; V_{i-1} – вільний об'єм у резервуарі, що відповідає тиску P_{\min} ; V_i – вільний об'єм у резервуарі, що відповідає тиску P_{\max} ; ΔV_i – об'єм палива, злитого в резервуар у циклах зливання при закритому дренажі; v_i – об'єм палива в резервуарі після злиття палива в i -тому циклі.

$$P_{\min \Gamma} = P_{\min} - P_s;$$

$$P_{\max \Gamma} = P_{\max} - P_s.$$

Для $i = 1$ $V_{i-1} = V_o$ (V_o – геометричний об'єм резервуара).

$$\text{Для } i = n \quad V_n = (0,7-0,8)V_o.$$

Система рівнянь (1)–(3) не враховує об'єму палива, злитого в заправний резервуар у процесі зливання при відкритому дренажі. Проте розрахунки, виконані в роботі [4] для ПГС, наведеної на рис. 1, з урахуванням параметрів системи в реальному проекті системи заправлення, показують, що тривалість зливання при відкритому дренажі не перевищує двох–трьох секунд, і кількістю злитого при цьому палива (≈ 2 л) можна знехтувати. Витрати дренажуваної парогазової суміші вибрано довільно (для конкретної системи заправлення), але в будь-якому випадку вони значно перевищуватимуть витрати палива, що зливається.

Систему рівнянь (1)–(3) розв'язано методом скінченних різниць. Значення вихідних параметрів, які взято довільно, подано в табл. 1.

Таблиця 1

№ п/п	Параметри	Значення параметрів	
		окиснювач	паливе
1	P_{\min} , кгс/см ² (абс.)	3,0	1,5
2	P_{\max} , кгс/см ² (абс.)	3,5	2,0
3	Температура КРП, що зливаються, °С	20	20
4	P_s , кгс/см ² (абс.)	0,98	0,167
5	$P_{\min \Gamma}$, кгс/см ² (абс.)	2,02	1,33
6	$P_{\max \Gamma}$, кгс/см ² (абс.)	2,52	1,83
7	$P_{\min \Gamma} / P_{\max \Gamma}$	0,801	0,726

Геометричний об'єм резервуара V_o беремо рівним 10 м^3 , об'єм палива, що зливається – $7,0-8,0 \text{ м}^3$.

Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Таблиця 2

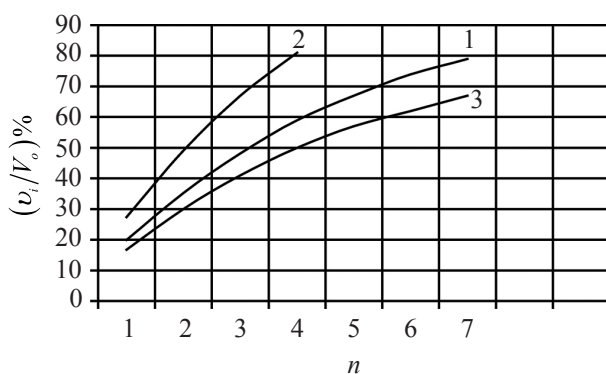
Цикл зливання	Результати розрахунків							
	ОКИСНЮВАЧ				ПАЛЬНЕ			
	$V_{i-1}, \text{м}^3$	$V_i, \text{м}^3$	$\Delta V_i, \text{м}^3$	$v_i, \text{м}^3$	$V_{i-1}, \text{м}^3$	$V_i, \text{м}^3$	$\Delta V_i, \text{м}^3$	$v_i, \text{м}^3$
1	10	8,01	1,99	1,99	10	7,26	2,74	2,74
2	8,01	6,48	1,53	3,52	7,26	5,27	1,99	4,73
3	6,48	5,19	1,29	4,81	5,27	3,83	1,44	6,17
4	5,19	4,16	1,03	5,84	3,43	2,87	1,05	7,22
5	4,16	3,33	0,83	6,67	2,78	2,02	0,76	7,98
6	3,33	2,67	0,66	7,33	—	—	—	—
7	2,67	2,14	0,53	7,86	—	—	—	—

Отже, як видно з розрахунків, зливання окиснювача з транспортних засобів у заправний резервуар виконується за сім циклів при закритому дренажі, пального – за п'ять циклів. Результати розрахунків може бути подано у вигляді графіків

$$(v_i/V_o) \cdot 100\% = f(n) \quad \text{при} \quad \frac{P_{\min \Gamma}}{P_{\max \Gamma}} = \text{const}$$

та $n = f\left(\frac{P_{\min \Gamma}}{P_{\max \Gamma}}\right)$ (n – кількість циклів зливання палива).

Графік $(v_i/V_o) \cdot 100\% = f(n)$ подано на рис. 2, де $(v_i/V_o) \cdot 100\%$ – ступінь заповнення резервуара паливом.

Рис. 2. Графік $(v_i/V_o) \cdot 100\% = f(n)$

1 – для $P_{\min \Gamma}/P_{\max \Gamma} = 0,801$;

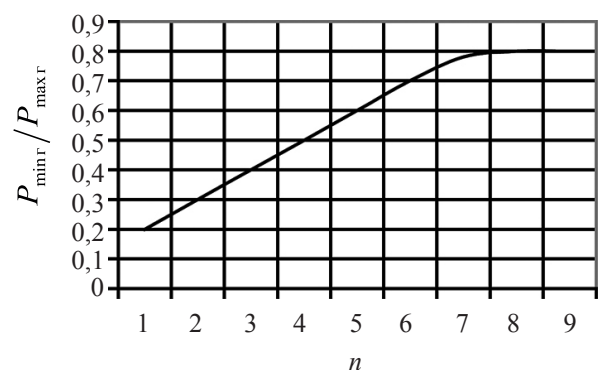
2 – для $P_{\min \Gamma}/P_{\max \Gamma} = 0,726$;

3 – для $P_{\min \Gamma}/P_{\max \Gamma} = 0,833$.

Криві рис. 2 показують залежність кількості циклів заправлення тієї самої порції палива від значень співвідношення $P_{\min \Gamma}/P_{\max \Gamma}$,

при цьому зі зменшенням цих значень кількість циклів заправлення зменшується, а зі зростанням – збільшується. Також видно, що в міру заповнення резервуара паливом об'єм палива, що заправляють, у кожному циклі заправлення (G_i) зменшується. Застосовуючи цю технологію для заправлення паливного бака РН, залежність $G_i = f(n)$ можна використовувати для додаткового контролю за об'ємом заповнення бака паливом.

Залежність $n = f\left(\frac{P_{\min \Gamma}}{P_{\max \Gamma}}\right)$ проілюстровано на графіку рис. 3.

Рис. 3. Графік $n = f\left(\frac{P_{\min \Gamma}}{P_{\max \Gamma}}\right)$

Наведена залежність має високу чутливість до температури палива. Так, за рівних умов зменшення температури палива, що зливається, з 20 до 5 °С призводить до збільшення кількості циклів із семи до дев'яти. Наведені результати розрахунків відповідатимуть будь-якому геометричному об'єму заправного резервуара за умов однакового об'єму заповнення паливом.

Аналіз параметрів зливання палива з транспортних засобів у заправний резервуар

Відповідно до попередніх допущень під час дренування парогазової суміші зниження тиску в заправному резервуарі відбувається за рахунок зниження маси газу у вільному об'ємі резервуара на величину ΔG .

$$\Delta G = G_1 - G_2,$$

де G_1 – маса газу за тиску $P_{\max \Gamma}$ в резервуарі;

G_2 – маса газу за тиску $P_{\min \Gamma}$ в резервуарі.

З рівняння стану для газу в закритому об'ємі отримуємо

$$G_1 = \frac{P_{\max \Gamma} V_1}{R_1 \cdot T};$$

$$G_2 = \frac{P_{\min \Gamma} V_2}{R_2 \cdot T},$$

де V_1 – газовий об'єм у резервуарі, що відповідає тиску $P_{\max \Gamma}$;

V_2 – газовий об'єм у резервуарі, що відповідає тиску $P_{\min \Gamma}$.

Раніше показано, що під час зливання з відкритим дренажем у резервуар надходить ≈ 2 л палива, тому беремо $V_1 \cong V_2$,

$$\text{тоді } \frac{G_1}{G_2} = \frac{P_{\max \Gamma}}{P_{\min \Gamma}}.$$

$$\text{Звідси } G_2 = G_1 \frac{P_{\min \Gamma}}{P_{\max \Gamma}}$$

$$\Delta G = G_1 \left(1 - P_{\min \Gamma} / P_{\max \Gamma} \right).$$

Величина об'єму дренуючого газу масою ΔG становитиме величину $V_{\text{др.г}}$

$$V_{\text{др.г}} = \Delta G / \rho_{\Gamma},$$

де ρ_{Γ} – густина гелію за тиску $P_{\max \Gamma}$

$$\rho_{\Gamma} = \frac{P_{\max \Gamma} \cdot 10^4}{R_{\Gamma} T}.$$

Оскільки разом з газом дренується й насичена пара палива, то об'єм дренуючої пари палива $V_{\text{др.п}}$ дорівнюватиме об'єму дренуючого газу $V_{\text{др.г}}$,

$$V_{\text{др.п}} = V_{\text{др.г}}.$$

Тоді, використовуючи дані табл. 1, 2, можна знайти об'єм пари палива $V_{\text{др.п.і}}$, що дренує в кожному циклі, і таким чином знайти сумарну масу дренуючої пари палива $G_{\text{др.п}}$

$$G_{\text{др.п}} = \sum_{i=1}^n V_{\text{др.п.і}} \rho_{\text{п}}. \quad (4)$$

Густина пари палива в кожному циклі зливання є постійною величиною і для температури 20 °C становить

$\rho_{\text{п "О"}} - 3,64 \text{ кг/м}^3$ – для окиснювача,

$\rho_{\text{п "Г"}} - 0,401 \text{ кг/м}^3$ – для пального.

Розрахунки, виконані в роботі [4] для конкретних умов, прийнятих для визначення кількості циклів зливання відповідно до табл. 2, показують, що під час зливання палива з підтриманням у резервуарі заданого тиску, шляхом чергування циклів зливання при закритому дренажі, і з дренуванням парогазової суміші з резервуара видаляються та повинні бути утилізовані ≈ 23 кг пари окиснювача та 2,3 кг пального.

Можна показати, що під час зливання палива при «відкритому дренажі», наприклад через регулятор тиску «до себе», за тих самих умов буде здреновано 29 кг пари окиснювача та 3,0 кг пального. Зменшення кількості дренуючої пари відповідно до запропонованої технології зливання становитиме ≈ 21 % пари окиснювача та ≈ 23 % пари пального. Ураховуючи зроблені раніше висновки про постійність v_1/V_o для одних і тих самих значень температури палива та відношення $P_{\min \Gamma}/P_{\max \Gamma}$, можна стверджувати, що під час зливання палива в резервуар з великим об'ємом можна істотно знизити кількість дренуючої пари лише за рахунок вибору відповідної технології зливання палива з транспортних засобів у заправний резервуар.

Деазотування під час зливання палива з транспортних засобів у заправний резервуар

Відповідно до умов зливання палива, що зливається в заправний резервуар, містить розбавлений гелій та азот і розпилюється в атмосфері гелію. Під час розпилювання палива в атмосфері гелію з палива виділяється азот, при цьому встановлюється вміст газу в масі злитого палива, рівний поточному

значенню парціального тиску азоту в газовому об'ємі резервуара. Ураховуючи циклічний характер зливання, у кожному циклі масу виділеного азоту знаходимо за формулою

$$G_i^{\text{вид}} = \Delta C_i \times \Delta V_i, \quad (5)$$

де $G_i^{\text{вид}}$ – маса азоту, виділеного зі злитого палива в i -тому циклі; ΔC_i – різниця концентрації азоту в компоненті палива C_o ; ΔV_i – об'єм злитого палива в i -тому циклі (узято відповідно до табл. 2)

$$\Delta C_i = C_o - C_i, \quad C_o = 0,25 \text{ г/л} - \text{const.}$$

Парціальний тиск виділеного азоту в кожному циклі зливання $P_i^{\text{вид}}$ знаходимо за формулою

$$P_i^{\text{вид}} = \frac{G_i^{\text{вид}} R_a T}{V_i}, \quad (6)$$

де V_i – газовий об'єм у заправному резервуарі після закінчення зливання палива при закритому дренажі в i -тому циклі (відповідно до табл. 2).

Сумарний (нагромаджений) парціальний тиск після закінчення зливання палива в i -тому циклі становитиме величину $\sum_{i=1}^n P_i^{\text{вид}}$

$$\sum_{i=1}^n P_i^{\text{вид}} = P_i^{\text{вид}} + \sum_{i=1}^{n-1} P_{i-1}^{\text{вид}}. \quad (7)$$

Слід відзначити, що в кожному циклі заправлення при закритому дренажі тиск у газовому об'ємі резервуара та парціальний тиск азоту в тому числі безперервно збільшуються пропорційно зменшенню газового об'єму в резервуарі. Однак під час наступного циклу заправлення при відкритому дренажі тиск у газовому об'ємі резервуара знижуватиметься і, як показують виконані розрахунки, компенсує зростання парціального тиску азоту за рахунок затискання газового об'єму в попередньому циклі. Тому вираз (7) беремо без урахування зазначених поправок значення тиску.

У кожному i -тому циклі зливання значення сумарного парціального тиску азоту $\sum_{i=1}^n P_i^{\text{вид}}$ відповідає поточному значенню величини концентрації азоту в паливі C_i .

$$C_i = \sum_{i=1}^n P_i^{\text{вид}} \times \kappa, \quad (8)$$

де κ – середньомасова величина концентрації азоту, для окиснювача – 0,04 г/л, для пального – 0,02 г/л.

Ураховуючи, що значення C_i в кожному циклі змінюються в процесі зливання палива, у розрахунках беремо середнє значення концентрації азоту в паливі $C_{i \text{ сеп.}}$

$$C_{i \text{ сеп.}} = \frac{C_{i-1} + C_i}{2}.$$

Залишкова маса азоту в паливі, злитому в резервуар в i -тому циклі зливання ΔV_i (відповідно до табл. 2) становитиме $G_{\text{зал.}i}$

$$G_{\text{зал.}i} = C_{i \text{ сеп.}} \times \Delta V_i. \quad (9)$$

Тоді сумарне значення маси залишкового азоту в злитому паливі становитиме величину $G_{\text{зал.}}$

$$G_{\text{зал.}} = \sum_{i=1}^n G_{\text{зал.}i}.$$

Початкова кількість азоту в паливі становитиме величину $G_{\text{поч}}$

$$G_{\text{поч}} = C_{\text{поч}} \times v,$$

де $C_{\text{поч}}$ – початкова концентрація азоту в паливі, що зливається ($C_{\text{поч}} = 0,25$ г/л); v – об'єм злитого палива.

Тоді маса виділеного азоту дорівнюватиме $G_{\text{вид}}$

$$G_{\text{вид}} = G_{\text{поч}} - G_{\text{зал.}}$$

Результати розрахунків, поданих у роботі [4], показують, що під час зливання палива початковий уміст розчиненого азоту знижується в окиснювачі на $\approx 84\%$, у пальному – на 92% , при цьому середньомасова величина концентрації азоту в окиснювачі становитиме 0,04 г/л, у пальному – 0,02 г/л. Однак використання технології деазотування палива характеризується істотним змінням концентрації азоту в різних шарах палива в заправному резервуарі. Наприклад, в об'ємі окиснювача значення концентрації азоту зміниться від 0,008 г/л у нижніх шарах палива до 0,09 г/л у верхніх шарах палива, в об'ємі пального – відповідно від 0,005 до 0,045 г/л. Таке розшаровування азоту в об'ємі палива пояснюється тим, що зі зливанням палива концентрація азоту в газовому об'ємі заправного резервуара зростає та визначає поточне значення кількості виділеного з палива азоту. Тому після закінчення зливання палива в заправний резервуар

передбачається короткочасне продування палива в заправному резервуарі гелієм: подачею його через барботажний пристрій з безперервним дренуванням надлишкового тиску парогазової суміші з газового об'єму резервуара в систему нейтралізації [5]. При цьому, оскільки нижній шар палива в резервуарі має низьку концентрацію азоту, а верхній шар – високу, бульбашки гелію, що продуваються через паливо, в основному забирають азот з верхніх шарів палива, і таким чином відбуватиметься вирівнювання й одночасно зниження концентрації азоту в різних шарах палива.

На кривих рис. 4 показано змінення концентрації азоту в об'ємі палива під час заповнення резервуара (суцільна лінія) та під час продування резервуара гелієм (пунктирна лінія)

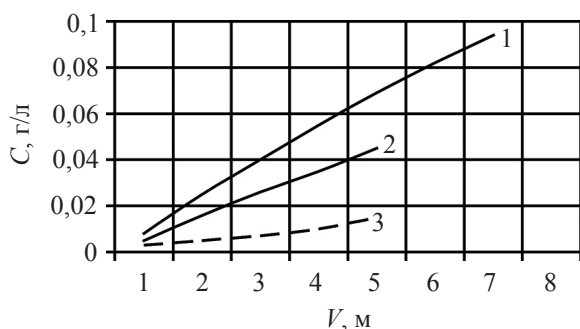


Рис. 4. Графік змінення концентрації розчиненого азоту в об'ємі злитого палива:

1 – окиснювач; 2 – пальне; 3 – окиснювач (після продування гелієм)

Слід відзначити, що зниження концентрації азоту в різних шарах палива під час продування його гелієм є нестационарним багатofункціональним процесом, теорію якого в цій статті не розглядаємо. Положення кривої 3 на графіку рис. 4 відображає якісне уявлення про процес, описання якого наведено вище. Більш точне положення кривих 1–3 можна отримати експериментальним шляхом.

Кількість гелію, використаного під час зливання палива з транспортних засобів

Відповідно до прийнятої технології зливання заправний резервуар наддувають гелієм перед зливанням до значення парціального тиску гелію $P_{\min \Gamma}$ (табл. 1) і здійснюють

зливання палива при закритому дренажі, у процесі якого парціальний тиск гелію підвищується до значення $P_{\max \Gamma}$. У процесі зливання парціальний тиск гелію в заправному резервуарі змінюється в межах $P_{\min \Gamma} - P_{\max \Gamma}$, при цьому тиск знижується від значення $P_{\max \Gamma}$ до значення $P_{\min \Gamma}$ шляхом дренування тиску за межі резервуара. Зливання палива виконується видавлюванням його гелієм із транспортних засобів (КЦ) з підтриманням тиску $P_{\text{вид}}$ у КЦ.

Тоді масу гелію, витраченого для зливання палива в заправний резервуар $G_{\text{гзл}}$, визначаємо з

$$G_{\text{гзл}} = G_{\text{гз}} + G_{\text{гКЦ}},$$

де $G_{\text{гз}}$ – маса гелію, видавленого із заправного резервуара; $G_{\text{гКЦ}}$ – маса гелію, витраченого на наддування КЦ.

$$G_{\text{гз}} = \frac{P_{\min \Gamma} \cdot V}{R_{\Gamma} \cdot T};$$

$$G_{\text{гКЦ}} = \frac{P_{\Gamma \text{ вид}} \cdot V_{\text{зл}}}{R_{\Gamma} \cdot T},$$

де $P_{\min \Gamma}$ – парціальний тиск гелію, що відповідає тиску наддування резервуара до початку зливання палива; V – геометричний об'єм резервуара; R_{Γ} – газова постійна гелію; T – температура палива, що зливається; $P_{\Gamma \text{ вид}}$ – парціальний тиск гелію в КЦ під час зливання палива; $V_{\text{зл}}$ – об'єм злитого палива.

Розрахунки, виконані для параметрів, поданих у табл. 1, показують, що витрати гелію під час зливання окиснювача становлять 6,65 кг, під час зливання пального – 5,14 кг.

Витрати гелію та винесення пари палива під час корегування концентрації гелію та азоту, після зливання палива протягом однієї години продуванням палива гелієм з витратою 0,1 г/л, становлять 7 кг гелію (для окиснювача та пального) і 3 кг пари окиснювача.

Для альтернативної технології підготування палива шляхом його барботування гелієм у заправному резервуарі після злиття в нього палива витрати гелію значно перевищуватимуть наведені вище значення. А саме в роботі [4] з посиланням на радянські джерела показано, що під час деазоту-

вання пального НДМГ в умовах, близьких до наведених у табл. 1, для зниження концентрації розчиненого азоту до значення 0,032 г/л було використано 244 м³ або 39 кг гелію. Відповідно, запропонована технологія підготування палива дозволяє істотно зменшити витрати гелію.

Висновки

У статті розглянуто оригінальну технологію зливання палива в заправний резервуар з транспортних засобів зі збереженням в паливі досягнутої концентрації гелію з одночасним деазотуванням палива. Для цього паливо, що зливається, розпилюється в атмосфері гелію з підтриманням у резервуарі заданого значення тиску шляхом чергування циклів зливання палива при закритому дренажі, а потім при відкритому. Технологія дозволяє одночасно забезпечити задану концентрацію гелію в паливі та виконати глибоке деазотування палива. Витрати гелію та кількість генеруючої пари палива нижче, ніж за традиційних методів геліювання палива. Отримані результати за збереження конкретних умов зливання може бути використано для різноманітних об'ємів палива, що зливається.

Список використаної літератури

1. Поздеев Г. Л., Кучеренко Р. А., Кучеренко Т. В. Исследование особенностей доставки на космодром компонентов ракетного топлива с заданным газонасыщением. Космическая техника. Ракетное вооружение: сб. науч.-техн. ст. / ГП «КБ «Южное». Днепр, 2019. Вып. 1. С. 38–44.
2. Поздеев Г. Л. Разработка и исследование методов обеспечения заданных параметров при заправке: дис. на соискание канд. техн. наук. ГП «КБ «Южное», 1978. Днепропетровск. 123 с.
3. КРК «Циклон-4М». Заправочно-нейтрализационная станция. Технический проект. С4М YZH-ANL 02802. ГП «КБ «Южное». 2017. 108 с.
4. КРК «Циклон-4М». Предложения по гелированию компонентов топлива для заправки 2-й ступени ракеты-носителя на ЗНС с учетом особенностей доставки топлива в герметичных контейнерах-цистернах. Научно-технический отчет. Циклон-4М. 21.18668.174 ОТ. ГП «КБ «Южное», 2019. 33 с.
5. Способ закрытой заправки топливного бака жидким топливом и система для его осуществления: пат. RU 2489327. В64F1/28.

Стаття надійшла 21.09.2020