

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СЛИВА СЖИЖЕННОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА ИЗ АВТОМОБИЛЬНЫХ БАЛЛОНОВ

Приведены основные технологические параметры процесса полного слива сжиженного нефтяного газа из автомобильного баллона, обуславливающие время нахождения автомобиля на посту слива ГСН. Расчетно-аналитическим методом обоснованы количественные значения этих параметров. Полученные результаты рекомендуются для практического применения.

Полный слив сжиженного нефтяного газа (ГСН) из автомобильного баллона возможно произвести только путем выдавливания из него избыточным давлением и перемещения в сливной резервуар жидкой фазы ГСН, отсоса из баллона паровой фазы ГСН и перекачивания ее тоже в сливной резервуар с последующим заполнением и частичной продувкой баллона инертным газом (дегазация). Основными технологическими параметрами такого процесса слива являются: время и давление, необходимое для слива жидкой фазы; время отсасывания паровой фазы и конечное давление в баллоне; время и давление при дегазации внутренней полости опорожняемого баллона /6/. Эти параметры обуславливают продолжительность полного слива из баллона ГСН, а значит и время нахождения автомобиля на посту слива. Естественно, количественные значения их должны быть технически обоснованы.

Время слива жидкой фазы ГСН $\tau_{ж}$ зависит от объема ее в баллоне и определяется из условия постоянства расхода через сливной шланг. Этот расход лимитируется максимально допустимой скоростью движения жидкой фазы (3 м/с), исключающей возникновение кавитации /1/. С учетом данного ограничения $\tau_{ж}$ возможно рассчитать по формуле

$$\tau_{ж} = 25,48 Y_{ж} d^{-2}, \quad (1)$$

где $Y_{ж}$ – объем жидкой фазы ГСН в баллоне, м³;
 d – внутренний диаметр сливного шланга, м.

Время слива при различных объемах жидкой фазы в баллоне и $d = 0,01$ м приведено в табл. 1.

Для нормального (без кавитации) слива жидкой фазы давление в автомобильном баллоне должно быть больше давления в сливном резервуаре на величину потерь в магистрали слива.

Таблица 1. Время слива жидкой фазы ГСН

Объем сливаемой жидкой фазы, л	10	15	25	50	100	150	200	250
Время слива, мин	0,71	1,06	1,77	3,54	7,07	10,06	14,19	17,68

$$P_{к} = P_{п} + H_{с}, \quad (2)$$

где $P_{к}$ – давление в автомобильном баллоне, необходимое для слива жидкой фазы ГСН, МПа;

$P_{п}$ – давление насыщенных паров ГСН в сливном резервуаре, МПа;

$H_{с}$ – общие потери давления в магистрали слива, МПа.

Общие потери давления (напора) в сливной магистрали равны сумме потерь на трение о стенки шланга, потерь на местные сопротивления, потерь в выходном сечении и гидростатического напора /2/. Для определения $H_{с}$ магистраль слива разбиваем на отдельные участки (рис. 1), на каждом из которых потери на трение и местные сопротивления будут иметь различные значения. Если принять, что потери на местные сопротивления составляют 1,3% от потерь на трение о стенки шланга /3/, то для определения общих потерь давления в сливной магистрали справедливо выражение /4, 6/

$$H_{с} = \frac{1,013 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{ж} \cdot \sum_{i=1}^K \lambda_i \cdot \ell_i \cdot V_i^2}{2d_i} + \frac{10^{-6} \cdot \rho_{ж} \cdot \alpha_k V_k^2}{2} - 9,81 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{ж} (h_H - h_K),$$

где $\rho_{жс}$ – плотность жидкой фазы ГСН, кг/м³;

λ_i – коэффициент трения на i -ом участке;

ℓ_i – длина i -го участка;

V_i – средняя скорость потока на i -м участке (определяется из условия постоянства расхода), м/с;

d_i – диаметр проходного сечения i -го участка, м;

K – количество участков на магистрали слива;

α_k – коэффициент кинетической энергии;

V_k – скорость потока в выходном сечении сливного трубопровода;

h_k и h_H – высота расположенная заборного и сливного сечений трубопроводов (см. рис. 1), м.

По приведенной формуле рассчитывались общие потери напора при сливе ГСН из баллонов Куйбышевского механического завода «Салют» при диаметрах приемной трубки расходного вентиля $d_{пт} = 4$ мм (вариант 1), 6 мм (вариант 2) и из баллонов Дружковского завода газовой аппаратуры с $d_{пт} = 8$ мм. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Анализируя результаты расчета H_c , заключаем, что с уменьшением диаметра приемной трубки расходного вентиля с 8 до 4 мм потери давления в сливной магистрали независимо от времени года возрастают в 12,7...12,8 раза. Поэтому $d_{пт}$ следует считать одним из основных факторов, влияющих на P_k . Во всех рассмотренных случаях в зимнее время года потери давления больше в 1,16...1,17 раза, чем в летнее. Это обусловлено увеличением плотности жидкой фазы ГСН с уменьшением температуры.

Давление насыщенных паров в сливном резервуаре P_p зависит от марки ГСН, температуры окружающей резервуар среды, которая обуславливается его расположением (наземным или подземным), и времени года (зима, лето). Так, в наземном резервуаре P_p будет в пределах 0,07...1,0 МПа при изменении температуры окружающего воздуха от -40 до $+40^\circ\text{C}$ [4]. При подземной установке сливного резервуара температура окружающей его среды (грунта), а значит и сжиженного газа изменяется незначительно:

Таблица 2. Общие потери давления в магистрали слива

Марка ГСН	Температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$	Потери давления, МПа		
		Вариант		
		1	2	3
ПБА СПБТЛ	+40	0,3712	0,0616	0,0290
	-40	0,3780	0,0627	0,0295
ПА СПБТЗ	+40	0,4295	0,0714	0,0337
	-40	0,4332	0,0720	0,0340

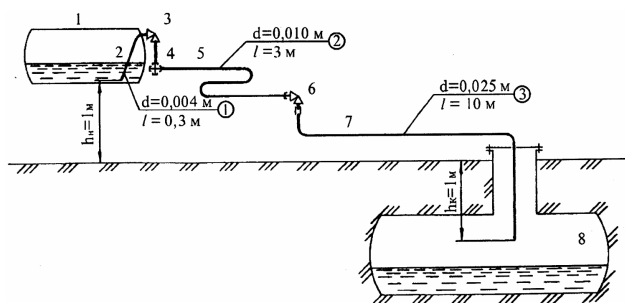


Рисунок 1. Схема определения потерь давления в сливной магистрали:

1 – автомобильный баллон; 2 – приемная трубка расходного вентиля жидкой фазы; 3 – расходный вентиль; 4 – крестовина; 5 – резервуар для слива ГСН; 6 – вентиль; 7 – трубопровод; 8 – резервуар для слива ГСН; (1), (2), (3) – номера участков сливной магистрали;

но: от -3°C зимой до $+11^\circ\text{C}$ летом [5]. Следовательно, давление насыщенных паров ГСН в нем лежит в пределах 0,30...0,46 МПа.

Суммируя давление насыщенных паров ГСН в сливном резервуаре и общие потери давления в магистрали слива (табл. 1), находим давление в автомобильном баллоне, необходимое для слива жидкой фазы ГСН. Полученные результаты свидетельствуют о следующем. Во всех рассматриваемых вариантах давление P_k при $d_{пт} = 4$ мм в 1,4...4,2 раза больше значения P_k при $d_{пт} = 8$ мм. Причем наибольшее превышение наблюдается в зимний период при наземном расположении сливного резервуара. В случаях, когда $d_{пт}$ равен 6 и 8 мм, величины P_k имеют близкие значения. Следовательно, для снижения энергетических затрат на слив ГСН из автомобильных баллонов приемные трубки их расходных вентилях жидкой фазы диаметром 4 мм должны быть заменены на трубки с $d_{пт} = 6...8$ мм.

Расположение сливного резервуара также оказывает существенное влияние на давление, необходимое для слива жидкой фазы ГСН. Так, наибольшее ($t = +40^\circ\text{C}$) и наименьшее ($t = -40^\circ\text{C}$) значения P_k имеют место при наземном расположении сливного резервуара. Этот факт вызван тем, что давление паров ГСН в автомобильном баллоне в этом случае равно давлению в сливном резервуаре. Чем выше температура окружающего воздуха, тем больше P_k .

При подземной же установке сливного резервуара давление в нем не равно давлению насыщенных паров ГСН в автомобильном баллоне. Причем температура резервуара изменяется в меньших пределах. Это приводит к тому, что разница величины P_k в летний и зимний периоды составляет 0,01...0,14 МПа. Поскольку давление в подземном резервуаре изменяется незначительно, а фактическое давление насыщенных паров ГСН в автомобильном баллоне может повыситься до 1,0 МПа, то в летний период при $t > +30^\circ\text{C}$ слив жидкой фазы ГСН из баллона можно производить без повышения давления в нем. С точки же зрения дополнительных энергетических затрат слив ГСН более выгодно производить в подземный сливной резервуар.

Изложенное свидетельствует, что давление, необходимое для слива жидкой фазы ГСН, изменяется в широких пределах в зависимости от расположения сливного резервуара, температуры автомобильного баллона, диаметра приемной трубки расходного вентиля жидкой фазы и марки ГСН. Использование полученных значе-

ний P_k на практике затруднительно. Хотя бы потому, что водитель не всегда точно знает, какая марка ГСН залита в баллон его автомобиля и какой диаметр приемной трубки расходного вентиля жидкой фазы ГСН в баллоне. Поэтому для практического применения по усредненным физическим свойствам различных смесей ГСН строились графические зависимости $P_k = f(P_p)$. По ним определялись средние значения P_k (табл. 3).

Проверка их адекватности по критерию Фишера при риске 0,1 показала [6], что точность их определения достаточна для использования в производственных условиях (при условии замены приемных трубок с $d_{пт} = 4$ мм на трубки с $d_{пт} = 6...8$ мм).

Из табл. 3 следует, что давление P_k при различных температурных условиях, с учетом расположения сливного резервуара, должно быть различным. Причем наименьшие энергетические затраты соответствуют $d_{пт} = 6...8$ мм. Применение же на практике строго фиксированных значений P_k (или больших расчетных) неизбежно приведет к возникновению кавитации в сливных трубопроводах.

После слива основной массы жидкой фазы ГСН внутренняя полость баллона будет заполнена некоторым количеством несливаемого остатка жидкой фазы и паровой фазой ГСН. Паровая фаза ГСН отсасывается из баллона и перекачивается в сливной резервуар. При этом в баллоне создается разрежение, а несливаемый остаток паровой фазы начинает интенсивно испаряться. Величина этого разрежения должна быть ниже давления упругости насыщенных паров основных компонентов ГСН при низких температурах окружающего воздуха. Но в то же время оно не может быть слишком низким из-за возможности деформации баллона.

Расчеты показали, что при давлении внутри баллона 10 кПа обеспечивается испарение основных компонентов несливаемого остатка жидкой фазы ГСН (пропана, бутана, изобутана) и исключается возможность деформации

Таблица 3. Средние значения давления, необходимого для слива жидкой фазы ГСН

Расположение сливного резервуара	Давление в резервуаре, МПа	Температура баллона, °С	Давление, необходимое для слива ГСН, МПа		
			Вариант		
			1	2	3
Наземное	0,93	+40	1,302	0,991	0,959
	0,09	-40	0,523	0,162	0,124
Подземное	0,42	+40	0,792	0,481	0,449
	0,35	-40	0,783	0,422	0,384

обечайки баллона (допустимое избыточное наружное давление на обечайку в 13,0...19,3 раза больше фактического).

Объем паров ГСН, образующихся в баллоне при снижении давления до 10 кПа, равен [4, 5/

$$V_n = (V_a - V_{но}) + \rho_{ж} V_{но} RT_{ж} Z_c (10^4 \mu_{см})^{-1}, \quad (4)$$

где V_a – полный объем автомобильного баллона, м³;

$V_{но}$ – объем несливаемого остатка жидкой фазы ГСН, м³;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкой фазы ГСН, кг/м³;

R – универсальная газовая постоянная;

$T_{ж}$ – температура не сливаемого остатка жидкой фазы ГСН при испарении, К;

Z_c – коэффициент сжимаемости смеси;

$\mu_{см}$ – молекулярная масса смеси ГСН, кг/кмоль.

Время, затрачиваемое на отсос из баллона образующихся паров ГСН, находится по формуле:

$$\tau_o = V_n / Q_k, \quad (5)$$

где Q_k – производительность компрессора, м³/ч.

Образование паров ГСН из несливаемого остатка жидкой фазы зависит от подвода тепла, необходимого для испарения. Время, затрачиваемое на испарение, равно [4/

$$\tau_{и} = \frac{\rho_{ж} \cdot V_{но} \cdot \sum_{i=1}^n q_i}{V_i}, \quad (6)$$

где q_i – массовая доля i -го компонента в смеси;

V_i – скорость испарения i -го компонента жидкой фазы ГСН, кг/ч.

Результаты расчетов по приведенным выше зависимостям представлены в табл. 4.

Из анализа этих зависимостей следует, что τ_u в 1,5...14,6 раза больше τ_o . Поэтому для ускорения процесса испарения необходимо в любое время года подогревать баллон (желательно теплым воздухом).

Так как время отсоса паровой фазы ГСН зависит от объема баллона, производительности компрессора, интенсивности испарения несливаемого остатка жидкой фазы ГСН, то на

Таблица 4. Время отсоса из баллона паров ГСН и испарения несливаемого остатка жидкой фазы (для баллона объемом 250 л)

Температура воздуха, °С	Масса остатка жидкой фазы, кг	Масса паровой фазы, кг	Объем паров ГСН, м ³	Время отсоса паров, ч	Время испарения остатка жидкой фазы, ч
+40	1,517	3,4760	25,41	0,630	0,93
-40	1,754	0,6447	10,08	0,252	3,67

практике его следует устанавливать по стабильности конечного давления в баллоне. Отсос паров нужно прекращать, если давление в баллоне в течение 2...3 мин. не превышает 12 кПа. Это соответствует разрежению в баллоне по вакуумметру, равному 91 кПа.

Дегазация баллона производится путем выдавливания паровой фазы ГСН, оставшейся в нем после отсасывания, и последующей продувки внутренней полости баллона инертным газом (предпочтительно азотом). Продолжительность дегазации рационально определять из расчета 1 мин. на 50 л объема. При этом обеспечивается меньшая скорость подачи азота в баллон. Расход азота на дегазацию не должен превышать 2-х объемов дегазируемого баллона. В этом случае обеспечивается постоянство часового расхода азота (табл. 5).

Давление, необходимое для дегазации баллона, определяем из условия постоянства часового расхода азота в течение заданного времени (см. табл. 5). В общем случае оно должно быть больше давления на выходе из продувочной свечи на величину потерь в магистрали дегазации. Для определения этих потерь магистраль дегазации разбиваем на отдельные участки (рис. 2).

Таблица 5. Время дегазации и расход азота

Показатель	Величина				
	50	100	150	200	250
Объем баллона, л					
Продолжительность дегазации, мин	1	2	3	4	5
Объем азота, затрачиваемого на дегазацию, л	100	200	300	400	500
Часовой расход азота, м ³ /ч	6	6	6	6	6

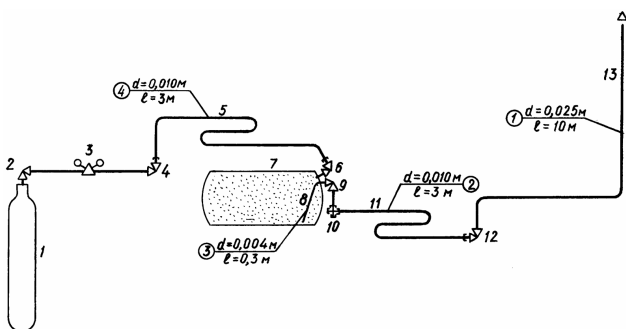


Рисунок 2. Схема определения потерь давления при дегазации автомобильных баллонов: 1 – баллон с азотом; 2 – вентиль баллона; 3 – редуктор; 4,12 – вентили; 5 – шланг подвода азота; 6 – дополнительный вентиль; 7 – автомобильный баллон; 8 – приемная трубка расходного вентиля жидкой фазы; 9 – расходный вентиль; 10 – крестовина; 11 – шланг отвода паровой фазы ГСН и азота; 13 – продувочная свеча; (1), (2), (3), (4) – номера участков магистрали дегазации

Давление на выходе из продувочной свечи принимаем на 5% больше нормального атмосферного давления. Тогда давление, необходимое для дегазации, будет равно

$$P_{\partial} = 1,05P + \sum_1^n (P_{ни} - P_{ки}), \quad (7)$$

где P – нормальное атмосферное давление, МПа;

n – количество участков магистрали дегазации;

$P_{ни}, P_{ки}$ – давление азота в начале и конце i -го участка магистрали дегазации, МПа.

Давление в начале каждого участка определяется по формуле /2, 3/

$$P_{ни} = [P_{ки} + 14,22\rho_u l_i (K_3 / d_i + 32,03\nu_u d_i)^{0,25} (36/d_i^5)]^{0,5}, \quad (8)$$

где ρ_u – плотность азота, кг/м³;

l_i – длина i -го участка, м;

K_3 – эквивалентная абсолютная шероховатость стенки трубопровода, м²/мм;

d_i – внутренний диаметр трубопровода i -го участка, мм;

ν_u – кинематическая вязкость азота, м²/с.

Результаты расчетов показали, что P_{∂} зависит от температуры окружающего воздуха и диаметра приемной трубки расходного вентиля жидкой фазы $d_{пт}$. Во всех рассматриваемых вариантах давление, необходимое для дегазации баллонов с $d_{пт} = 4$ мм, больше давления при $d_{пт} = 8,0$ мм в 2,0...2,4 раза. Причем наибольшее превышение соответствует зимнему периоду /6/.

Рекомендуемое давление дегазации баллонов азотом в зависимости от времени года и диаметра приемной трубки расходного вентиля жидкой фазы ГСН приведено в табл. 6. Контроль расхода азота, затрачиваемого на дегазацию, следует производить по ротаметру.

Продолжительность полного слива из баллона сжиженного газа определяется суммой времени на слив жидкой фазы ГСН, на отсос паровой фазы ГСН и на дегазацию внутренней полости баллона /6/

$$\tau_{сл} = \tau_{ж} + \tau_{о} + \tau_{д}, \quad (9)$$

где $\tau_{сл}$ – время полного слива ГСН, мин.;

$\tau_{д}$ – продолжительность дегазации, мин.

Количественное значение каждой из указанных величин для разных автомобильных баллонов приведено в табл. 7.

Сравнив полученные значения $\tau_{сл}$, нетрудно видеть, что наименьшее время затрачивается на слив ГСН в зимнее время года при под-

Таблица 6. Давление дегазации автомобильных баллонов азотом

Период года	Пределы температуры воздуха, °С	Диаметр приемной рубки расходного вентиля, мм	Рекомендуемое давление дегазации, МПа
Летний	от +40 до +10	4	0,38...0,40
		6	0,22...0,23
		8	0,19...0,20
Весенне-осенний	от +10 до -10	4	0,40...0,42
		6	0,23
		8	0,19
Зимний	от -10 до -40	4	0,42...0,44
		6	0,23...0,24
		8	0,19...0,20

Примечание. Нижний предел рекомендуемого давления соответствует большей температуре воздуха; верхний предел – меньшей.

земном расположении сливного резервуара. Это свидетельствует о рациональности установки на постах слива подземных сливных резервуаров.

Выводы

1. Разработаны основные технологические параметры процесса слива ГСН из автомобильных баллонов: время и давление, необходимое

Таблица 7. Время полного слива ГСН (при диаметре приемной трубки расходного вентиля жидкой фазы 6 мм)

Объем баллона	50	100	150	200	250
Время слива жидкой фазы ГСН, мин	3,54	7,07	10,60	14,15	17,68
Время отсоса паровой фазы ГСН, мин	9,41	16,35	23,00	29,65	37,23
	5,17	8,54	11,23	13,87	16,52
Продолжительность дегазации, мин	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
Время полного слива ГСН, мин	13,95	25,42	36,60	47,80	59,91
	9,71	17,61	24,83	39,02	39,20

Примечание: числитель – летнее время года, температура +40°С, наземное расположение сливного резервуара; знаменатель – зимнее время года, температура -40°С, подземное расположение сливного резервуара.

для слива жидкой фазы; время отсасывания паровой фазы и конечное давление в баллоне; время и давление при дегазации внутренней полости опорожняемого баллона.

2. Теоретически обоснованы их количественные значения.

3. Эти значения могут быть использованы при разработке постов слива и реализации процесса слива.

Список использованной литературы:

1. Автомобильные газонаполнительные станции: Справочное пособие / Ю.С. Гайстер, Б.А. Глодский, М.А. Маевский и др. - М.: Недра, 1989. 128 с.
2. Борисов С.Н., Даточный В.В. Гидравлические расчеты газопроводов. – М.: Недра, 1972. – 112 с.
3. Дегоченко А.В., Михеев А.Л., Волков М.М. Спутник газовика: Справочник. – М.: Недра, 1978. – 311 с.
4. Примеры гидравлических расчетов / Под ред. Н.М. Константинова. – М.: Транспорт, 1987. – 440 с.
5. Стаскевич Н.Л., Видгорчик Д.Я. Справочник по сжиженным углеводородным газам. – Л.: Недра, 1986. – 543 с.
6. Теоретическое обоснование и разработка научно-технических рекомендаций по выбору методов опорожнения сжиженного нефтяного газа из автомобильного баллона: Отчет о НИР №ДП-96, Омск, СибАДИ, 1996. – 97 с.