

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАСХОДА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

УДК [662.767::629.331]:657.471

И.С. Медведков, к.т.н., ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Москва, Россия),
I_Medvedkov@vniigaz.gazprom.ru

Использование сжиженного природного газа в качестве моторного топлива неразрывно связано с понятием потерь. Списание этого горючего для предприятий, имеющих на балансе собственный топливозаправочный пункт, сопряжено с определением как удельных расходов для курсирующих транспортных средств, так и потерь на станции хранения и в блоке отгрузки. Разделить данные процессы чрезвычайно сложно. Независимые вычисления для различных резервуаров (элементов технологического оборудования) с последующим суммированием результатов или их отнесением к какой-либо статье расходов некорректны, поскольку косвенные потери, связанные с несовершенством процессов и применяемого технологического оборудования, способны привести к существенному увеличению общих. Последние же могут быть определены только при совместном расчете всех элементов оборудования.

В настоящей статье представлена универсальная методика, позволяющая вычислить потери жидкости и пара, возникающие в ходе использования сжиженного природного газа в стандартных циклах, и отнести эти затраты к эксплуатационным нормам расхода топлива. Разработанный подход применен для расчета расходов путем моделирования обращения сжиженного природного газа в многоэлементной технологической системе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СЖИЖЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ, РАСХОД, БАЗОВАЯ НОРМА, ПОТЕРИ, ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НОРМА, ДЕГРАДАЦИЯ СОСТАВА.

КЛАССИФИКАЦИЯ НОРМИРУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАСХОДА ТОПЛИВА

При нормировании расхода сжиженного природного газа (СПГ), как правило, различают следующие значения этого показателя [1]:

- базовое (базовая линейная норма расхода (БЛНР) СПГ);
- нормативное, учитывающее условия эксплуатации транспортного средства (ТС), выполняемую им работу и потери СПГ, возникающие при его хранении на борту ТС и в процессе заправки (эксплуатационная норма расхода (ЭНР) СПГ).

Базовая линейная норма расхода СПГ определяется двумя методами или их комбинацией:

- на основе анализа путевых листов, протоколов подконтрольной эксплуатации и заправки автомобильного транспортного средства (АТС);
- на основе специально организованных замеров фактического расхода топлива.

Последний подход предусматривает два этапа:

- измерение фактического расхода СПГ в рамках пробега АТС на испытательных участках с периодической заправкой;
- расчет БЛНР топлива на основе фактического значения путем применения индивидуальных поправочных коэффициентов, для чего используют несложную зависимость:

$$N^{base} = m / K^{meas}, \quad (1)$$

где N^{base} – БЛНР СПГ, кг/(100 км); m – фактический расход СПГ за период контрольного пробега, кг/(100 км); K^{meas} – суммарный поправочный коэффициент, учитывающий условия, при которых осуществлялся замер фактического расхода, безразмерная величина.

Эксплуатационная норма расхода СПГ определяется путем применения индивидуальных

поправочных коэффициентов к величине БЛНР, а также с учетом дополнительной поправочной надбавки, связанной с технологическими потерями этого вида топлива, возникающими при его хранении на борту АТС и в процессе заправки, по формуле:

$$N^{op} = N^{base} \cdot K^{op} \cdot (1 + \varepsilon_M^{op}), \quad (2)$$

где N^{op} – ЭНР СПГ, кг/(100 км); K^{op} – суммарный поправочный коэффициент, учитывающий условия эксплуатации АТС без технологических потерь, безразмерная величина; ε_M^{op} – удельные эксплуатационные потери СПГ (отношение массы потерь СПГ за расчетный эксплуатационный период к его массе, израсходованной на выполнение полезной работы за тот же период), безразмерная величина.

Суммарный поправочный коэффициент необходим в соответствии с [2], чтобы показать влияние

I.S. Medvedkov, PhD in Engineering, Gazprom VNIIGAZ LLC (Moscow, Russia), I_Medvedkov@vniigaz.gazprom.ru

Methodological approaches to determining liquefied natural gas consumption in operating automotive vehicles

Using liquefied natural gas as a motor fuel is inextricably related to the concept of loss. For companies with an in-house fueling station, writing this fuel off involves determining specific costs for operating vehicles and loss at storage station and shipping block. It is extremely complicated to separate these processes. It would be incorrect to compute the results for different tanks (process equipment elements) independently and then sum or classify them as any object of expenditure. This is because the indirect losses associated with process imperfection and process equipment used can considerably increase the total loss. The latter can only be determined by joint computing of all the equipment elements.

The article presents the universal technique to compute liquid and vapor losses during the liquefied natural gas use in standard loops and include these expenses in operating fuel consumption rates. The approach is used to calculate the consumptions by simulation of liquefied natural gas handling in a multi-element process system.

KEYWORDS: LIQUEFIED NATURAL GAS, CONSUMPTION, BASELINE CONSUMPTION RATE, LOSS, OPERATING CONSUMPTION RATE, COMPOSITION DOWNGRADING.

на расход топлива комбинации различных внешних факторов.

Чтобы получить летнюю и зимнюю БЛНР топлива, измерения фактического расхода следует провести не менее двух раз: в летний период (в самый жаркий месяц года) и в зимний (в самый холодный месяц).

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПГ В КАЧЕСТВЕ ГАЗОМОТОРНОГО ТОПЛИВА, КЛАССИФИКАЦИЯ ПОТЕРЬ

Особенности использования СПГ в качестве газомоторного топлива заключаются в следующем:

- на автомобильной заправочной станции (АЗС) (или на топливозаправочном пункте (ТЗП)) и на борту ТС имеют место потери СПГ;

- в процессе использования происходит изменение компонентного состава СПГ, что приводит к ухудшению его эксплуатационных характеристик (уменьшению метанового числа),

- по сравнению с традиционными видами топлива при использовании СПГ меняется длительность технологических операций (сокращается время хранения горючего, увеличивается продолжительность заправки).

Определение величин эксплуатационного расхода СПГ на транспортном предприятии при его использовании в качестве моторного топлива связано с понятием

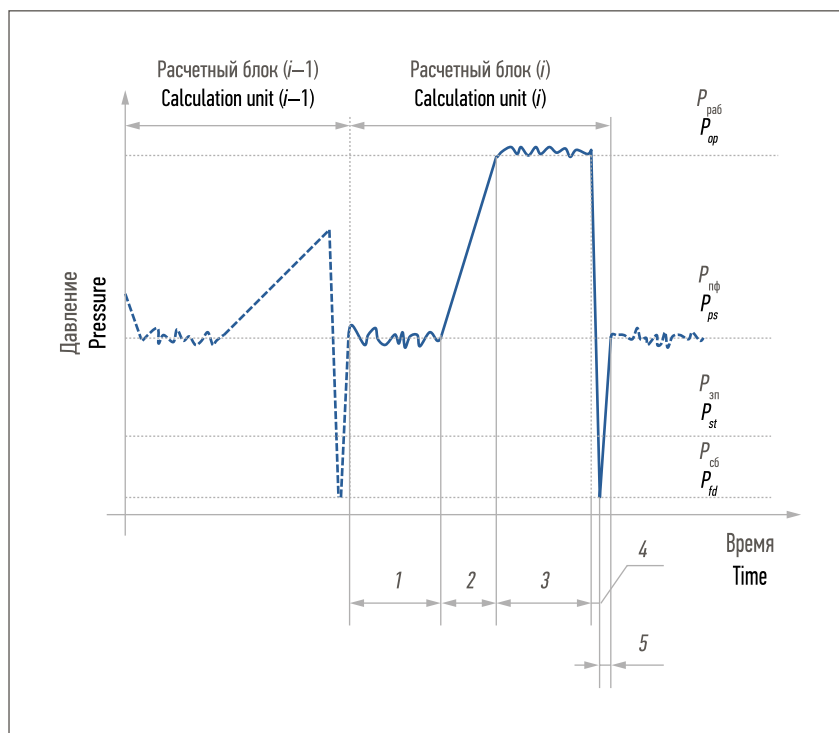


Рис. 1. Циклограмма движения АТС, изображенная на диаграмме зависимости давления от времени, с выделением расчетного блока универсального вида. Элементы цепи расчетного блока: 1 – движение АТС на маршруте, 2 – стоянка АТС без сброса паров, 3 – стоянка АТС со сбросом паров, 4 – сброс паров из БКТ для снижения давления перед заправкой, 5 – заправка БКТ и набор давления с помощью испарителя самонаддува (окончание подготовки БКТ). $P_{раб}$ – рабочее давление БКТ, МПа; $P_{оп}$ – давление переключателя фаз и давление саморегулирования, МПа; $P_{нф}$ – давление СПГ в расходном резервуаре, МПа; $P_{пс}$ – конечное давление сброса паров из БКТ перед заправкой, МПа
Fig. 1. Automotive vehicle route cyclogram put over the time – pressure diagram, with the universal calculation unit indicated. Elements of the calculation unit chain: 1 – automotive vehicle route, 2 – automotive vehicle stop with no vapor discharge, 3 – automotive vehicle stop with vapor discharge, 4 – vapor discharge from the cryogenic fuel tank for pressure reduction before fueling, 5 – fueling the cryogenic fuel tank and pressure buildup using a self-pressurizing vaporizer (end of cryogenic fuel tank preparation). $P_{раб}$ – operating pressure of the cryogenic fuel tank, МПа; $P_{пс}$ – phase shifter pressure and self-adjustment pressure, МПа; $P_{ст}$ – liquefied natural gas pressure in the service tank, МПа; P_{fd} – final vapor discharge pressure from the cryogenic fuel tank before fueling, МПа

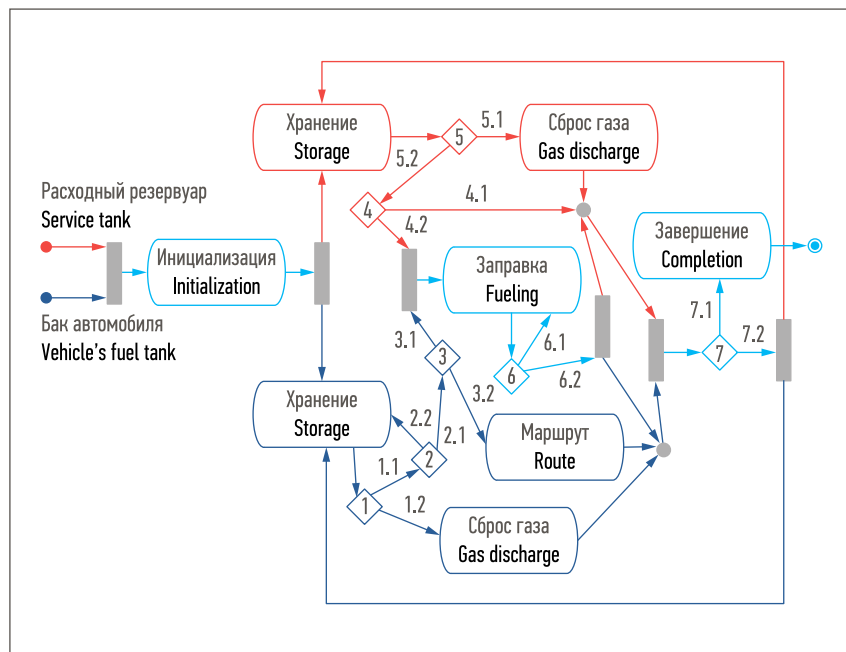


Рис. 2. Граф описания циклограммы расчетной системы в нотации UML
Fig. 2. Cyclogram description graph for the simulated system, UML notation

Таблица 1. Описание состояний расчетной системы на рис. 2
Table 1. Description of the simulated system states on fig. 2

Наименование состояния State	Описание Description
Инициализация Initialization	–
Хранение Storage	Хранение криогенного продукта с закрытым дренажем Cryogenic product storage with closed drain
Сброс газа Gas discharge	Сброс пара из резервуара Vapor discharge from the tank
Заправка Fueling	Заправка резервуара Tank fueling
Маршрут Route	Хранение криогенного продукта с закрытым дренажем с отбором вещества Cryogenic product storage with closed drain and sampling
Завершение Completion	–

потерь. Они возникают на этапе каждой технологической операции обращения СПГ и подразделяются на три вида:

- потери жидкости, при которых она переходит в газообразное состояние. Могут быть компенсированы за счет совершения дополнительной работы и отвода тепла от паров СПГ с последующей их реконденсацией и возвратом в систему;

- потери парогазовой фракции. Невосполнимы, поскольку она удаляется из системы через свечное или факельное устройство. В некоторых случаях (например, при производстве СПГ на газораспределительных станциях, а также его хранении в системах приема, хранения и регазификации, когда возможен сброс паров в сеть низкого давления и их использование для привода электрогазогенераторов)

данной вид может считаться компенсируемым;

- косвенные потери продукта, вызванные списанием неликвидного СПГ. Обусловлены деградацией компонентного состава при продолжительном обращении этого топлива и могут быть сокращены за счет использования методов кондиционирования.

В работе [3] показано, что есть возможность частичной или полной компенсации потерь и деградации жидкости за счет дополнительных энергетических и других эксплуатационных затрат, а также дополнительных капитальных расходов, появляющихся в системах реконденсации и кондиционирования СПГ. Целесообразность применения последних должна определяться на предынвестиционной стадии, исходя из окупаемости указанных мер по сбору и утилизации паров, а также неликвидного СПГ.

При разработке регламента криогенных АЗС и ТЗП необходимо учесть все особенности использования СПГ в качестве моторного топлива, в том числе определить его потери при проведении технологических операций, длительность последних и степень деградации состава продукта.

Анализ опыта реализации современных проектов показал, что основные способы ограничения выбросов (потерь) СПГ и обеспечения совместимости оборудования криогенных АЗС и бортовых топливных систем (КБТС) – это:

- выбор корректных характеристик КБТС, устанавливаемых на АТС;
- соблюдение срока бездренажного хранения СПГ на борту ТС в криогенных топливных баках (БКТ) путем организации корректной периодичности выхода на маршрут и заправки АТС на СПГ;
- переход от двух- к однолинейной заправке с верхним наполнением для конденсации паров в БКТ;
- унификация, совершенствование заправочных и приемных устройств;

Таблица 2. Описание условий перехода расчетной системы на рис. 2
Table 2. Description of the simulated system transition conditions on fig. 2

Номер условия Condition No.	Описание Description
1	Давление в баке выше давления срабатывания клапана или некоторой заданной величины? Ветвление 1.1 – нет, 1.2 – да Is the pressure in the fuel tank higher than the valve setting pressure or some set pressure? Branching 1.1: no, 1.2: yes
2	Текущее время соответствует началу рабочего дня, день рабочий, АТС готово к выезду на маршрут? Ветвление 2.1 – да, 2.2 – нет Is it currently the beginning of a working day? Is the automotive vehicle ready to depart on the route? Branching 1.1: yes, 1.2: no
3	Уровень заполнения жидкости в КБТС ниже минимально необходимого? Ветвление 3.1 – да, 3.2 – нет Is the liquid fill level in the onboard cryogenic fuel system lower than the required minimum? Branching 3.1: yes, 3.2: no
4	В очереди на заправку есть автомобиль? Ветвление 4.1 – нет, 4.2 – да Is there a vehicle in the fueling queue? Branching 4.1: no, 4.2: yes
5	Давление в резервуаре выше давления срабатывания клапана или некоторой заданной величины? Ветвление 5.1 – да, 5.2 – нет Is the pressure in the storage tank higher than the valve setting pressure or some set pressure? Branching 5.1: yes, 5.2: no
6	Выполнено любое условие завершения заправки (вне зависимости от успешности)? Ветвление 6.1 – нет, 6.2 – да Is any of the fueling completion conditions met (regardless of success)? Branching 6.1: no, 6.2: yes
7	Выполнено любое условие завершения моделирования (вне зависимости от успешности)? Ветвление 7.1 – да, 7.2 – нет Is any of the simulation completion conditions met (regardless of success)? Branching 7.1: yes, 7.2: no

Таблица 3. Параметры расходного резервуара, установленного на ТЗП
Table 3. Parameters of the fueling station service tank

Параметр Parameter	Значение (варианты) Value (scenarios)	
Объем сосуда Vessel volume	8,0 м ³ (m ³)	
Рабочее давление (абс.) Operating pressure (abs.)	0,8 МПа (MPa)	
Величина теплопритока (температура охлаждающей среды – 300 К, температура СПГ – 135 К) Heat input (ambient temperature – 300 K, liquefied natural gas temperature – 135 K)	30 Вт (W)	
Наличие насоса Pump available	Да Yes	Нет No
Давление (абс.) за насосом (при наличии) Pressure (abs.) downstream the pump (if available)	1,8 МПа (MPa)	

– оптимизация потребления и логистики доставки СПГ на криогенные АЗС;

– установка блоков реконденсации паров и их сбора в аккумуляторы, блоков кондиционирования СПГ.

Сказанное выше позволяет концептуально разделить подходы к определению эксплуатационных расходов СПГ.

Подход 1 – транспортноцентричный, когда транспортное эксплуа-

тирующее предприятие имеет АТС и осуществляет его периодическую заправку на криогенных АЗС сторонней компании. В этом случае может быть использован расчет добавочных удельных эксплуатационных потерь по формуле (2). Обобщенная методика определения их элементарных составляющих в рамках указанного подхода приведена в разделе «Подход 1. Определение...».

Подход 2 – системный, когда предприятие, использующее АТС на СПГ, самостоятельно осуществляет заправку, т.е. дополнительно эксплуатирует собственный криогенный ТЗП. В этом случае может быть применена универсальная расчетная методика, позволяющая определить расходы жидкости и пара, возникающие в технологических операциях при обращении СПГ в стандартных циклах, и отнести эти затраты к ЭНР топлива.

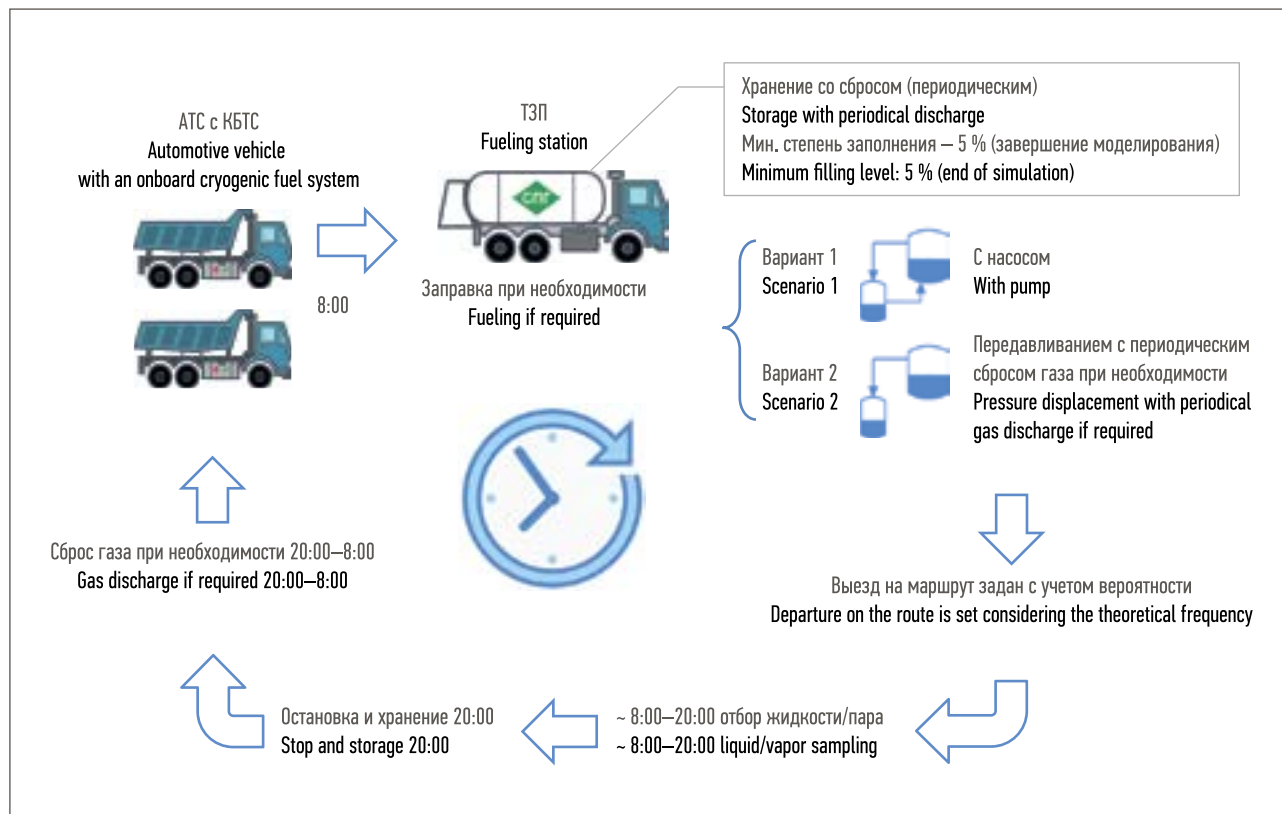


Рис. 3. Иллюстрация циклограммы, использованной для моделирования
Fig. 3. Illustration of cyclogram used for simulation

Описание и пример расчета по данной методике приведены в разделе «Подход 2. Определение...».

Подход 3 развивает предыдущий за счет утилизации отпарного газа, которая представляет собой совокупность процессов и способов сбора и использования паров СПГ, образующихся в ходе нормальной эксплуатации объекта потребления данного топлива, в целях предотвращения или снижения количества выбросов паров в атмосферу через систему газосброса. Эта процедура – часть последовательной политики стран, входящих в Европейский союз. Из-за существенного влияния метана как парникового газа членами Европейской газомоторной ассоциации (NGVA Europe) [4] принят стандарт «нулевой эмиссии» для штатных режимов эксплуатации криогенных АЗС и автомобильных газонаполнительных компрессорных станций [5]. В этом случае потери СПГ условно равны нулю, и данный подход можно считать наиболее перспективным.

Следует отметить, что при любом из перечисленных выше подходов будут наблюдаться изменения характеристик продукта и фиксироваться его потери, если не в количественном, то в качественном (денежном) выражении. В подходе 3 это выразится в дополнительных затратах на реконденсацию и (или) компримирование и (или) в снижении выручки из-за реализации отпарного газа в виде компримированного природного по более низкой цене.

ПОДХОД 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РАСХОДА ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЦИКЛОГРАММ ДВИЖЕНИЯ АТС НА СПГ

В основе рекомендуемой методики лежит анализ характерных циклограмм движения АТС на СПГ. Здесь под циклограммой понимается последовательность (комбинация) ее расчетных блоков. Они представляют собой совокупную цепь технологических операций

при эксплуатации АТС и исходные данные, характеризующие условия проведения последовательности процедур, осуществляемых периодически и многократно за расчетный эксплуатационный период (условный интервал, принятый при расчете технологических потерь СПГ, в рамках которого укладываются по времени возникновения и протяженности все основные технологические операции, наиболее характерные для стандартной эксплуатации АТС в составе организации).

Определение эксплуатационных затрат на основе анализа циклограмм носит во многом вероятностный характер. Пример расчетных блоков приведен на рис. 1. На нем цифрами от 1 до 5 обозначены элементы цепи, при этом потери массы наблюдаются только в пределах 3-го и 4-го. Для циклограмм упрощенного типа (рис. 1) применима формула (3):

$$\varepsilon_M^{op} = \frac{\sum_k \{ \Delta M_{vsk} + \Delta M_{vfk} \}}{G}, \quad (3)$$

Таблица 4. Параметры криогенного бака, установленного на АТС
Table 4. Parameters of the automotive vehicle's cryogenic tank

Параметр Parameter	Значение (варианты) Value (scenarios)	
Объем сосуда Vessel volume	0,5 м ³ (m ³)	
Рабочее давление (абс.) Operating pressure (abs.)	1,9 МПа (MPa)	
Величина теплопритока (температура охлаждающей среды – 300 К, температура СПГ – 135 К) Heat input (ambient temperature – 300 K, liquefied natural gas temperature – 135 K)	2,7 Вт (W)	
Максимальная степень заполнения Maximum filling level	90 %	
Наличие переключателя фаз Phase shifter available	Да Yes	Нет No
Давление переключения фаз (абс.) Phase shifter pressure (abs.)	0,4 МПа (MPa)	0,8 МПа (MPa)

$$\Delta M_{vsk} = v_k \cdot \Delta M_{sk}, \quad (4)$$

$$\Delta M_{vfk} = v_k \cdot \Delta M_{fk}, \quad (5)$$

где ΔM_{sk} – потери парожидкостной среды в пределах k -го расчетного блока циклограммы в рамках технологической операции хранения, кг; ΔM_{fk} – потери парожидкостной среды в пределах k -го расчетного блока циклограммы в рамках технологических операций подготовки к заправке / заправки, кг; ΔM_{vsk} и ΔM_{vfk} – взвешенные величины потерь, кг; v_k – вероятность (частота) возникновения k -го расчетного блока циклограммы за расчетный эксплуатационный период, безразмерная величина; G – средний расход СПГ в рамках суточного пробега АТС, кг.

Для расчета темпа роста давления в процессе бездренажного хранения, а также величины потерь при сбросе паров СПГ рекомендуется использовать выражения, приведенные в работах [3] и [6].

ПОДХОД 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РАСХОДА ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭВОЛЮЦИИ СПГ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

В основе данного подхода к определению эксплуатационных расходов топлива – идея о том, что действительная величина потерь, а значит, и искомого показателя может быть установлена

только в комплексе, путем расчета эволюции системы в целом. В текущем разделе приведены примеры вычислений для полноценных систем, позволяющие обозначить существующие нюансы в использовании как самих АТС на СПГ, так и инфраструктуры, обеспечивающей их работу. Основная цель – расчетным путем выйти на показатели ЭНР топлива, учитывающие не только расходы СПГ при движении АТС, но и потери, связанные с функционированием криогенных заправочных объектов, находящихся на балансе организации.

Система в данном случае означает самодостаточную совокупность криогенных резервуаров и парожидкостных смесей конечной массы, которые связаны друг с другом периодически протекающими технологическими процессами, чья последовательность, условия и параметры однозначно описываются циклическим разветвляющимся алгоритмом. Криогенная парожидкостная смесь (в данном случае СПГ и его пары) может находиться (частично или полностью) в любом из резервуаров и быть задействована (частично или полностью) в теплообмене. В ходе протекания технологического процесса допускается отбор из системы части или какой-либо фазы смеси.

В результате расчета определяется эволюция криогенной паро-

жидкостной смеси во времени – получается корреляция всех параметров, отраженная на соответствующей шкале.

Обобщая положения предыдущего раздела, можно сформулировать определение циклограммы как циклического разветвляющегося алгоритма, обуславливающего эволюцию системы. Выше (раздел «Подход 1. Определение...») был формализован частный случай описания циклограмм, когда система ограничена одним резервуаром (БКТ), установленным на борту АТС. В общем случае подобный алгоритм может быть описан ориентированным графом в любой из стандартизированных нотаций. Соответствующий пример приведен на рис. 2.

Здесь показан алгоритм совместного расчета двух резервуаров. Первый (расходный) представляет собой стационарную емкость большого объема. Второй (криогенный бак) размещен на борту ТС. Линия эволюции первого резервуара обозначена красным цветом, второго – синим, а голубой соответствует их совместному развитию после операций синхронизации. Описание основных состояний приведено в табл. 1, условий переходов – в табл. 2. Например, причинами завершения заправки могут быть: опустошение расходного резервуара, превышение максимальной степени заполнения или

Таблица 5. Основные параметры расчетной системы с вариантами
Table 5. The main parameters of the simulated system, scenarios

Параметр Parameter	Значение Value		
Количество АТС Number of automotive vehicles	2		
Начальные давления (абс.): Initial pressures (abs.):			
в расходном резервуаре in the service tank	0,6 МПа (МПа)		
в КБТС 1 in the onboard cryogenic fuel system 1	0,6 МПа (МПа)		
в КБТС 2 in the onboard cryogenic fuel system 2	0,8 МПа (МПа)		
Начальные степени заполнения: Initial filling levels:			
в расходном резервуаре in the service tank	85 %		
в КБТС 1 in the onboard cryogenic fuel system 1	30 %		
в КБТС 2 in the onboard cryogenic fuel system 2	50 %		
Состав СПГ в начале моделирования (табл. 6) Liquefied natural gas composition at the start of simulation (table 6)	Смесь 1 Mixture 1	Смесь 2 Mixture 2	Смесь 3 Mixture 3
Минимальная степень заполнения КБТС, при достижении которой принимается решение об осуществлении дозаправки: The minimum filling level of the onboard cryogenic fuel system above which it is decided to refuel:			
в начале рабочей недели at the start of the working week	80 %		
перед выездом в любой другой день before departure any other day	30 %		
Величина эксплуатационного расхода топлива для АТС без учета потерь СПГ Operating consumption for the automotive vehicle, liquefied natural gas losses not considered	33 кг/(100 км) 33 kg/(100 km)		
Режим работы АТС Automotive vehicle operation schedule	8:00–20:00		
	Ежедневно, кроме выходных Every working day	Вероятность выезда 25 %, кроме выходных Theoretical frequency of departures 25 % on working days	
Минимальная степень заполнения расходного резервуара (условие остановки расчета) The minimum filling level of the service tank (criterion of the simulation end)	5 %		

Таблица 6. Модельные компонентные составы СПГ
Table 6. Model compositions of LNG

Наименование Component	Смесь 1, мольн. % Mixture 1, mol. %	Смесь 2, мольн. % Mixture 2, mol. %	Смесь 3, мольн. % Mixture 3, mol. %
Метан Methane	99,097	95,088	90,045
Этан Ethane	0,302	3,500	6,540
Пропан Propane	0,033	0,910	2,200
и-Бутан i-Butane	0,009	0,152	0,290
н-Бутан n-Butane	0,010	0,166	0,280
Неопентан Neopentane	0,006	0,003	0,010
и-Пентан i-Pentane		0,040	
н-Пентан n-Pentane	0,004	0,028	0,010
н-Гексан n-Hexane	0	0,011	0
Азот Nitrogen	0,534	0,084	0,600
CO ₂	0,004	0,015	0,025
O ₂	0	< 0,005	0
Марка по ГОСТ Р 56021 [7] Grade as per GOST R 56021 [7]	А (A)	Б (B)	В (V)

давления в баке. Данные, приведенные в табл. 1 и 2, могут быть без труда расширены для случая большего количества курсирующих ТС. При этом добавится дополнительное условие синхронизации, обусловленное простым АТС в очереди на заправку, однако оно может быть реализовано расширением условия 2 (табл. 2). В остальном общий вид графа останется неизменным.

Результат расчета системы по циклограмме, аналогичной той, что изображена на рис. 2, представляет собой значение ЭНР расхода топлива, определяемое по следующей формуле:

$$N^{op} = 100 \cdot \frac{\sum_i^n M_{bi} - \sum_i^n M_{ei}}{\sum_j^p L_j}, \quad (6)$$

где M_{bi} и M_{ei} – начальная и конечная масса парожидкостной среды в i -м резервуаре системы, кг; L_j – суммарный пробег j -го АТС на СПГ за расчетный период, км; n – число

резервуаров в расчетной системе; p – число АТС на СПГ в расчетной системе.

В качестве примера приводится расчет по указанной методике для системы, определенной рядом условий. Рассматриваемая система – предприятие, имеющее ТЗП СПГ с емкостью объемом 8 м³ и два АТС с КБТС объемом 500 л каждая. Сводные параметры расходного резервуара приведены в табл. 3, АТС с КБТС – в табл. 4, расчетных режимов и условий инициализации – в табл. 5, состав модельных компонентов – в табл. 6. Расчетная циклограмма схематически изображена на рис. 3.

Таким образом, может быть сформировано несколько комбинаций расчетных вариантов, описание которых приведено в табл. 7. Общее число возможных в соответствии с обозначенным перечнем вероятных условий задач – 36. В ходе предварительного анализа ре-

зультатов моделирования было решено сократить количество вариантов до 14, что достаточно для демонстрации основных тенденций и зависимостей.

Методические подходы, примененные для расчета состояния системы на каждом шаге моделирования, изложены в работе [3]. Результаты приведены в табл. 8.

ВЫВОДЫ

При определении расхода топлива в России используются понятия базовых линейных (или просто базовых) и эксплуатационных норм расхода топлива. Вторые отличаются от БЛНР надбавками, связанными с особенностями эксплуатации ТС на СПГ. Поскольку этот продукт совершает многочисленные фазовые переходы в процессе своего обращения в цикле использования, эксплуатационные расходы СПГ обусловлены его потерями при проведении технологических операций.

Таблица 7. Варианты моделирования расхода топлива
Table 7. Fuel consumption simulation scenarios

№ варианта Scenario No.	Давление переключения фаз (абс.), МПа Phase-shifting pressure (abs.), MPa	Состав СПГ в начале моделирования* Liquefied natural gas composition at the start of simulation*	Наличие насоса Pump available	Режим работы АТС. Вероятность выхода на маршрут (кроме выходных), % Automotive vehicle operation schedule. Theoretical frequency of departure on the route, working days, %
1	Отсутствует None	Смесь 1 Mixture 1	Да Yes	100
2	Отсутствует None	Смесь 1 Mixture 1	Нет No	100
3	Отсутствует None	Смесь 2 Mixture 2	Да Yes	100
4	Отсутствует None	Смесь 2 Mixture 2	Да Yes	25
5	Отсутствует None	Смесь 2 Mixture 2	Нет No	100
6	Отсутствует None	Смесь 2 Mixture 2	Нет No	25
7	Отсутствует None	Смесь 3 Mixture 3	Да Yes	100
8	Отсутствует None	Смесь 3 Mixture 3	Да Yes	25
9	Отсутствует None	Смесь 3 Mixture 3	Нет No	100
10	Отсутствует None	Смесь 3 Mixture 3	Нет No	25
11	0,4	Смесь 2 Mixture 2	Да Yes	25
12	0,4	Смесь 3 Mixture 3	Нет No	100
13	0,4	Смесь 3 Mixture 3	Нет No	25
14	0,8	Смесь 3 Mixture 3	Нет No	100

* Примечание. См. табл. 6

* Note. See table 6

Существующие сегодня методики учета не в полной мере применимы при определении норм расхода топлива для СПГ. Действующие значения не учитывают возникновение и накопление косвенных потерь, не формулируют условия их перехода в прямые, не принимают во внимание особенности, связанные с обращением СПГ повышенного давления и деградацией компонентного состава.

В настоящей статье представлена универсальная расчетная методика, позволяющая определить расходы жидкости и пара, возникающие в технологических

операциях при обращении СПГ в стандартных циклах использования, и отнести их к ЭНР топлива. Разработанный подход применен для определения эксплуатационных расходов путем моделирования обращения СПГ в многоэлементной технологической системе. В целом заметны следующие основные тенденции, выявленные по результатам моделирования:

- при регулярных выездах АТС величина эксплуатационных расходов выше БЛНР на 4–7 %;
- при использовании насоса и двухлинейной схемы заправки эксплуатационные расходы ниже,

чем при заправке передавливанием (4 % против 6–7 %). Общее количество тепла (потенциальные потери), аккумулируемое в системе, остается приблизительно одинаковым при любой из перечисленных технологий. Различия заключаются только в том, где оно преобразуется в прямые потери (сброс газа). В случае двухлинейной заправки с насосом весь избыток тепла передается и накапливается в расходном резервуаре, тогда как при передавливании основные потери наблюдаются при подготовке бака к заправке (сброс газа) и в ходе циклического

Таблица 8. Результаты моделирования
Table 8. Simulation results

№* No.*	Эксплуатационная величина расхода топлива, кг/(100 км) Operating fuel consumption, kg/(100 km)	Среднесуточный пробег АТС, км Daily run of an automotive vehicle, km	Общий пробег АТС, км Total run of an automotive vehicle, km	№ емкости** Tank No.**	Метановое число Methane number		Содержание CO ₂ , ppm CO ₂ content, ppm		Содержание CH ₄ , мольн. % CH ₄ content, mol. %		Марка СПГ по [7] Liquefied natural gas grade as per [7]	
					до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after
1	34,3	134,3	6714,5	1	103	103	42	45	99	99	A (A)	A (A)
				2	103	103	40	44	99	99	A (A)	A (A)
				3	103	103	39	47	99	99	A (A)	A (A)
2	35,1	129,6	6611,2	1	103	103	42	47	99	99	A (A)	A (A)
				2	103	103	40	47	99	99	A (A)	A (A)
				3	103	103	39	46	99	99	A (A)	A (A)
3	34,3	134,3	6715,8	1	94	93	160	171	95	94	Б (B)	В (V)
				2	94	93	152	171	95	94	Б (B)	В (V)
				3	94	93	150	175	95	94	Б (B)	В (V)
4	41,2	133,6	5877,2	1	94	89	160	222	95	93	Б (B)	В (V)
				2	94	86	152	257	95	91	Б (B)	В (V)
				3	94	86	150	264	95	91	Б (B)	В (V)
5	35,0	130,3	6647,2	1	94	93	160	175	95	94	Б (B)	В (V)
				2	94	92	152	178	95	94	Б (B)	В (V)
				3	94	93	150	173	95	94	Б (B)	В (V)
6	43,6	131,3	5645,2	1	94	86	160	267	95	91	Б (B)	В (V)
				2	94	87	152	254	95	92	Б (B)	В (V)
				3	94	85	150	277	95	91	Б (B)	В (V)
7	34,3	133,9	7499,9	1	83	80	268	296	90	89	В (V)	В (V)
				2	83	81	256	292	90	89	В (V)	В (V)
				3	84	80	251	302	90	88	В (V)	В (V)
8	42,1	135,5	6231,5	1	83	63	268	486	90	81	В (V)	-
				2	83	72	256	393	90	85	В (V)	-
				3	84	58	251	539	90	78	В (V)	-
9	34,8	130,1	7414,7	1	83	81	268	293	90	89	В (V)	В (V)
				2	83	80	256	296	90	89	В (V)	В (V)
				3	84	80	251	298	90	88	В (V)	В (V)
10	44,3	131,5	5786	1	83	69	268	429	90	83	В (V)	-
				2	83	69	256	432	90	83	В (V)	-
				3	84	61	251	510	90	79	В (V)	-
11	41,0	134,6	5921,7	1	94	87	160	257	95	91	Б (B)	В (V)
				2	94	86	152	265	95	91	Б (B)	В (V)
				3	94	84	150	283	95	90	Б (B)	В (V)

(Продолжение таблицы на с. 96)

(Продолжение таблицы. Начало на с. 95)

№* No.*	Эксплуатационная величина расхода топлива, кг/(100 км) Operating fuel consumption, kg/(100 km)	Среднесуточный пробег АТС, км Daily run of an automotive vehicle, km	Общий пробег АТС, км Total run of an automotive vehicle, km	№ емкости** Tank No.**	Метановое число Methane number		Содержание CO ₂ , ppm CO ₂ content, ppm		Содержание CH ₄ , мольн. % CH ₄ content, mol. %		Марка СПГ по [7] Liquefied natural gas grade as per [7]	
					до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after
12	33,9	130,5	7178,6	1	83	80	268	297	90	89	B (V)	B (V)
				2	83	81	256	293	90	89	B (V)	B (V)
				3	84	81	251	292	90	89	B (V)	B (V)
13	43,3	135,2	5948,9	1	83	62	268	504	90	80	B (V)	–
				2	83	62	256	504	90	80	B (V)	–
				3	84	60	251	524	90	79	B (V)	–
14	34,8	132,1	7395,7	1	83	80	268	297	90	89	B (V)	B (V)
				2	83	81	256	293	90	89	B (V)	B (V)
				3	84	81	251	292	90	89	B (V)	B (V)

* Примечание. Номер варианта соответствует табл. 5

* Note. Scenario numbers are as per table 5

** Примечание. Номера емкостей соответствуют: 1 – КБТС на АТС № 1; 2 – КБТС на АТС № 2; 3 – резервуар на ТЗП

** Note. Tank numbers are: 1 – onboard cryogenic fuel system of automotive vehicle No. 1; 2 – onboard cryogenic fuel system of automotive vehicle No. 2; 3 – fueling station service tank

процесса заполнения с периодическим стравливанием давления;

– при нерегулярных выездах на маршрут величина эксплуатационных расходов существенно увеличивается (до 34 % сверх базовой нормы);

– в ходе эволюции системы состав газа неизбежно деградирует. В конце моделирования он может не соответствовать изначально заявленным характеристикам. Особенно сильно это проявляется при нерегулярных выездах АТС на маршрут. В вариантах расчета 8, 10, 13 (табл. 8) состав жидкости деградирует до полного несоответствия действующим техническим условиям [7] для СПГ. Данный эффект проще всего может быть купирован за счет более частого обновления СПГ в расходном резервуаре, например если производить его заправку при достижении степени заполнения 15–25 %;

– кристаллизация диоксида углерода при моделировании не обна-



ружена ни на одном из расчетных вариантов. Это говорит о достаточности требований марок А – В (по [7]) к содержанию CO₂ в СПГ и о преимуществах использования повышенного давления газа в резервуарном парке (0,4–1,0 МПа);

– при использовании переключателя фаз эксплуатационные расходы сокращаются. Сколь-либо значимое уменьшение наблюдается только при давлении переключения фаз

ниже, чем рабочее в расходном резервуаре (< 0,8 МПа). Это связано с тем, что часть избытка тепла, аккумулируемого в системе, может быть утилизирована при движении ТС за счет отбора из паровой шапки бака. Стоит отметить, что при настройке переключателя фаз на давление 0,4 МПа эксплуатационные потери сокращаются на 9–25 %. Наибольший эффект достигается при регулярном движении АТС. ■

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

List of symbols

ϵ_M^{op} – удельные эксплуатационные потери сжиженного природного газа (отношение массы потерь топлива за расчетный эксплуатационный период к массе топлива, израсходованного на выполнение полезной работы за тот же период), безразмерная величина

specific operating loss of liquefied natural gas (fuel loss weight in the operational calculation period divided by fuel weight consumed for useful work in the same period), dimensionless value

G – средний расход сжиженного природного газа в рамках суточного пробега автотранспортного средства, кг

average liquefied natural gas consumption within the daily run, kg

K^{mass} – суммарный поправочный коэффициент, учитывающий условия, при которых осуществлялся замер фактического расхода, безразмерная величина

overall correcting factor for the actual consumption measurement conditions, dimensionless value

K^{op} – суммарный поправочный коэффициент, учитывающий условия эксплуатации автотранспортного средства без технологических потерь, безразмерная величина

overall correcting factor for the vehicle operating conditions, process losses not considered, dimensionless value

L_j – суммарный пробег j -го автотранспортного средства на сжиженном природном газе за расчетный период, км

total run of the j liquefied natural gas vehicle in the calculation period, km

ΔM_{usk} и ΔM_{vfk} – взвешенные величины потерь, кг

weighted losses, kg

M_{bi} и M_{fi} – начальная и конечная масса парожидкостной среды в i -м резервуаре системы, кг

initial and final liquid-vapor medium weight in the i tank of the system, kg

ΔM_{fk} – потери парожидкостной среды в пределах k -го расчетного блока циклограммы в рамках технологических операций подготовки к заправке / заправки, кг

liquid-vapor medium loss within the k calculation unit of the pre-fueling process operations / fueling cyclogram, kg

ΔM_{sk} – потери парожидкостной среды в пределах k -го расчетного блока циклограммы в рамках технологической операции хранения, кг

liquid-vapor medium loss within the k calculation unit of the storage process operations, kg

m – фактический расход сжиженного природного газа за период контрольного пробега, кг/(100 км)

actual liquefied natural gas consumption during the test run, kg/(100 km)

N^{base} – базовая линейная норма расхода сжиженного природного газа, кг/(100 км)

baseline liquefied natural gas consumption rate, kg/(100 km)

N^{op} – эксплуатационная норма расхода сжиженного природного газа, кг/(100 км)

operating liquefied natural gas consumption rate, kg/(100 km)

n – число резервуаров в расчетной системе

number of tanks in the simulated system

p – число автотранспортных средств на сжиженном природном газе в расчетной системе

number of liquefied natural gas automotive vehicles in the simulated system

v_k – вероятность (частота) возникновения k -го расчетного блока циклограммы за расчетный эксплуатационный период, безразмерная величина

theoretical frequency of the k calculation unit of the cyclogram in the operational calculation period, dimensionless value

ЛИТЕРАТУРА

1. Министерство транспорта Российской Федерации. Распоряжение № АМ-23-р от 14.03.2008 г. О введении в действие методических рекомендаций «Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_76009/ (дата обращения: 19.05.2021).
2. Маняшин А.В. Прогнозирование и планирование ресурсов на автомобильном транспорте с использованием информационных технологий. Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2015.
3. Горбачев С.П., Медведков И.С. Изменение компонентного состава СПГ при его длительной транспортировке и хранении, методы кондиционирования // Газовая промышленность. 2018. № 10 (775). С. 56–66.
4. NGVA Europe Report of Activities 2017–2018 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ngva.eu/wp-content/uploads/2018/12/NGVA-Europe_Report-of-Activities-2017-2018.pdf (дата обращения: 19.05.2021).
5. Tobar M. Evaluation of the recommended future standards. LNG Blue Corridors Project [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ingbc.eu/system/files/deliverable_attachments/LNG_BC_D4.5_Evaluation%20of%20the%20recommended%20future%20standards.pdf (дата обращения: 19.05.2021).
6. Горбачев С.П., Медведков И.С., Кириенко К.И. Определение изохорной теплоемкости двухфазной смеси для анализа процессов в криогенных системах хранения // Технические газы. 2016. Т. 16. № 3. С. 24–30. DOI: 10.18198/j.ind.gases.2016.0823.
7. ГОСТ Р 56021–2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200110779> (дата обращения: 19.05.2021).

REFERENCES

- (1) Ministry of Transport of the Russian Federation. Resolution No. AM-23-r of 14 March 2008. On enactment of guidelines "Automotive fuel and lubricants consumption rates". Available from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_76009/ [Accessed: 19 May 2021]. (In Russian)
- (2) Manyashin AV. Forecasting and Planning Road Transport Resources Using Information Technologies. Tyumen, Russia: Tyumen Industrial University; 2015. (In Russian)
- (3) Gorbachev SP, Medvedkov IS. Change of component composition of liquefied natural gas during its longterm transportation and storage, conditioning methods. Gas Industry [Gazovaya promyshlennost']. 2018; 775(10): 56–66. (In Russian)
- (4) NGVA Europe. Report of Activities 2017–2018. Available from: https://www.ngva.eu/wp-content/uploads/2018/12/NGVA-Europe_Report-of-Activities-2017-2018.pdf [Accessed: 19 May 2021].
- (5) Tobar M. Evaluation of the Recommended Future Standards. LNG Blue Corridors Project. Available from: http://ingbc.eu/system/files/deliverable_attachments/LNG_BC_D4.5_Evaluation%20of%20the%20recommended%20future%20standards.pdf [Accessed: 19 May 2021].
- (6) Gorbachev SP, Medvedkov IS, Kirienko KI. Determination of the isochoric heat capacity of a two-phased mixture to analyse processes in cryogenic storage systems. Industrial gases [Tekhnicheskie gazy]. 2016; 16(3): 24–30. (In Russian)
- (7) Federal Agency on Technical Regulating and Metrology. GOST R 56021–2014 (state standard). Liquefied natural gas. Fuel for combustion engines and power plants. Specifications. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/1200110779> [Accessed: 19 May 2021]. (In Russian)