

УДК.621.43: 62-66: 62-62.

Е. В. БЕЛОУСОВ

Херсонская государственная морская академия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ СЕПАРАЦИИ ТОПЛИВА В ТОПЛИВНОМ БАЛАНСЕ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с утилизацией отходов сепарации тяжелых топлив путем их газификации и объединения процесса газификации с процессом рециркуляции отработавших газов двигателя. На основании укрупненной модели процессов выполнена оценка материального и энергетического балансов на основных стадиях процесса газификации при использовании в качестве газифицирующего агента смеси, состоящей из отработавших газов двигателя и водяного пара. На основе проведенного анализа показана техническая выполнимость и экономическая целесообразность использования комплексной утилизации шламов при эксплуатации судовых дизельных установок.

Ключевые слова: газификация, сепарация, шламы, дизельный двигатель.

Актуальность проблемы. Современная судовая энергетика стоит перед серьезной дилеммой, с одной стороны условия конкурентоспособности диктуют необходимость снижения стоимости перевозок, с другой – рост экологических требований значительно сужает возможности для повышения эффективных показателей судовых двигателей [1].

Уже более двадцати лет на мировом флоте наблюдается тенденция перевода всех типов двигателей на тяжелые топлива, стоимость которых значительно ниже светлых нефтепродуктов. В то же время использование этих топлив заставило двигателестроителей столкнуться с целым рядом проблем, к числу которых можно отнести значительные потери топлив, связанных с необходимостью их очистки [1, 2]. Для обеспечения заданной чистоты топлива на судне подвергаются сепарации, в результате которой 0,5...1,5% их переходит в отходы очистки, так называемые шламы [2]. Дальнейшее хранение, переработка и утилизация шламов является сложной процедурой, несущей большую опасность для окружающей среды. Проблема накопления шламов может быть проиллюстрирована следующими цифрами: контейнеровоз, рассчитанный на перевозку 3000 стандартных 20-дюймовых контейнеров, имеет мощность главного двигателя порядка 32 МВт, потребляя при этом более 130 тонн топлива в сутки. При этом накопление шламов за этот период может составлять от 0,5 до 2 тонн. В результате, значительная часть горючих компонентов топлива извлекается из энергетического баланса, а хранение и сдача на берег накопленных шламов требуют дополнительных затрат времени и средств.

Эффективным методом решения проблемы использования шламов на судне может стать их газификация с последующим использованием генера-

торного газа в главном или вспомогательных двигателях [3, 4]. Это позволит не только использовать часть горючих компонентов шламов в энергетическом балансе судна, но и значительно сократить накопление их на борту.

Целью данной работы является оценка материального и энергетического балансов на основных стадиях процесса газификации шламов при использовании в качестве газифицирующего агента смеси отработавших газов двигателя и водяного пара.

Решение проблемы. Газификация шламовых отходов в судовых энергетических установках (СЭУ) имеет ряд существенных преимуществ перед другими видами их использования, в частности перед их прямым сжиганием во вспомогательном энергетическом оборудовании. К числу таких достоинств можно отнести:

- возможность получения газообразного топлива, которое не содержит или от которого легко отделить механические примеси;

- возможность использовать газообразные продукты газификации в качестве топлива для главных и вспомогательных двигателей, а также для вспомогательного энергетического оборудования (в водогрейных и паровых котлах, инсинераторах и т.д.);

- возможность использовать газификацию шламов как самостоятельный процесс, так и включать ее в процессы, связанные с работой другого энергетического оборудования, включая общий тепло- и массообмен с этим оборудованием [4].

Примером последнего решения может быть включение устройства для газификации шламовых отходов в систему рециркуляции отработавших газов главного двигателя [3]. Такой подход позволяет одновременно решить ряд задач:

- вернуть горючие компоненты шламов в энер-

гетический баланс двигателя;

- понизить содержание кислорода в рециркулируемых газах, что должно сказаться на экологических показателях энергетической установки;

- часть теплоты отработавших газов может быть использована на поддержание оптимальных температур в газогенераторе для обеспечения протекания эндотермических реакций, в результате чего газогенератор исполняет функции химического регенератора теплоты [4].

Для более детального изучения возможностей использования газификации шламов в энергетическом балансе судовой энергетической установки была разработана укрупненная математическая модель, встроенная в модель рабочего процесса судового двигателя. Модель представляет собой комплекс термохимических и термодинамических уравнений, описывающих процессы, происходящие в газогенераторе. В качестве газифицирующего агента модель позволяет рассматривать использование атмосферного воздуха, отработавших газов двигателя, водяного пара и их смеси между собой в различных пропорциях. В качестве газифицируемого топлива используются шламы различной степени влажности. Кроме того, модель позволяет учитывать тепло-массообмен между отработавшими газами, и топливом (шламами) в газогенераторе, подвод тепла от отработавших газов в различные зоны газогенератора и отвод теплоты на получение водяного пара, необходимого для паровой газификации топлива.

Для оценки работоспособности модели был рассчитан процесс газификации шламовых отходов в газогенераторе, включенном в систему рециркуляции отработавших газов главного судового дизеля типа 9ЧН 43/61 (МаК 43С). Основные характеристики двигателя приведены в табл. 1.

Таблица 1
Характеристики главного двигателя СЭУ

Параметр	Значение
Тип главного двигателя	МаК 9М43С
по ГОСТ	9ЧН 43/61
Мощность, кВт	8000
Частота вращения, мин ⁻¹	500
Удельный расход топлива, кг/(кВт×ч)	0,176

Двигатель СЭУ работает с большим коэффициентом избытка воздуха – 3,24.

Значительный избыток кислорода позволяет создать условия для более полного сгорания топлива, но в тоже время, его присутствие в свободном виде способствует более интенсивному образованию оксидов азота в камере сгорания. Даже несмотря на относительно невысокую максимальную температуру цикла (1690 К) в камере сгорания, всегда присутствуют локальные зоны, в которых тем-

пература значительно выше, что в совокупности с наличием свободного кислорода способствует образованию оксидов азота (NO_x). Для рассматриваемого двигателя содержание NO_x в отработавших газах находится на уровне 12 г/(кВт×ч).

Расчеты показывают, что на выпуске отработавшие газы, без учета серы, имеют следующий состав и характеристики (табл. 2):

Таблица 2
Состав и основные характеристики отработавших газов дизеля

Состав газов на выходе из дизеля на 1кг топлива				кг/ч
Компонент	моль	кг	%, масс.	
M _{CO₂}	0,073	3,210	6,975	4517,2
M _{H₂O}	0,057	1,025	2,228	1442,8
M _{O₂}	0,227	7,252	15,760	10206,7
M _{N₂}	1,233	34,528	75,037	48595,7
Σ	1,590	46,014	100,0	64762,4
Свойства отработавших газов				
Молярная масса, г/моль				28,946
Температура за турбиной, К				563,15
Теплоемкость, кДж/(кмоль×К)				23,861

Эффективным способом снижения выбросов оксидов азота является снижение концентрации кислорода в рабочем цилиндре путем рециркуляции отработавших газов [1]. Однако большое количество свободного кислорода в отработавших газах (15,67%) делает такую рециркуляцию для судовых двигателей малоэффективной.

Повысить эффективность рециркуляции можно путем снижения концентрации кислорода в газах, отводимых для повторного использования в двигателе. Этого можно добиться путем выжигания кислорода в газогенераторном процессе с использованием отходов сепарации. При этом горючие компоненты шламов переходят в генераторный газ, который попадая в рабочие цилиндры, участвует в процессе сгорания. Для повышения эффективности процесса газификации, часть теплоты отработавших газов целесообразно использовать для подогрева газогенератора, а часть для получения пара, добавление которого к отработавшим газам на входе в газогенератор позволит повысить теплопроводную способность газа. Таким образом, не только часть горючих компонентов топлива будет возвращена в энергетический баланс дизельной установки, но и часть теплоты отработавших газов будет использована на эндотермические реакции в газогенераторе и в виде химических связей возвращена обратно в рабочий цилиндр.

Фактически в предлагаемом процессе будет иметь место химическая регенерация теплоты.

При выходе отходов сепарации 0,85% от массы расходуемого двигателем топлива, каждый час образуется 11,96 кг/ч шламов. Так как зола, входящая

в состав шламов, в процессе газификации не участвует, масса реагирующих компонентов составит 10,77 кг/ч при зольности 10%. Сухая горючая масса будет иметь тот же состав, что и исходное топливо. При влажности шламов 10% в газогенератор будет поступать топливо следующего состава (табл. 3):

Таблица 3
Состав отходов сепарации

Компонент	Сухая горючая масса топлива			Масса влажного топлива		
	% масс.	кг	моль	% масс.	кг	моль
C	87,6	8,385	0,699	77,9	8,385	0,699
H ₂	11,4	1,090	0,273	10,1	1,090	0,273
O ₂	1,0	0,096	0,003	0,9	0,096	0,000
H ₂ O	—	—	—	11,1	1,196	0,006
	100	9,571	0,974	100	10,767	0,978

С помощью разработанной программы расчета был оптимизирован состав дутьевого агента подаваемого в газогенератор.

Газифицирующий агент, представляющий собой смесь водяного пара с отработавшими газами двигателя. На рис. 1 представлены зависимости, показывающие влияние на состав генераторного газа, количества газифицирующего агента и содержания в нем водяного пара.

Расчеты показали, что наиболее эффективным с точки зрения термодинамики процесса газификации является режим, при котором на вход газогенератора подается 51 кг/ч газифицирующего агента, представляющего собой смесь 88,1% отработавших газов двигателя и 11,9% водяного пара (см. рис. 1). Состав дутьевого агента, поступающего в газогенератор, представлен в табл. 4.

Таблица 4
Состав дутьевого агента на входе в газогенератор

Компонент	моль/ч	кг/ч	%, масс.
CO ₂	0,073	3,210	6,289
H ₂ O	0,337	6,074	11,901
O ₂	0,226	7,247	14,200
N	1,232	34,505	67,610
Σ	1,869	51,036	100

Из рис. 1 видно, что повышение количества водяного пара ведет к росту теплоты сгорания продуктов газификации, но одновременно это приводит к снижению температуры в восстановительной зоне газогенератора. Повышение количества водяного пара свыше 20% для заданных условий вызовет нарушение температурного режима процесса газификации и сделает его невозможным. В частности для рассматриваемого случая температура в восстановительной зоне составляет 722 К, что находится на границе необходимого для протекания восстановительных реакций.

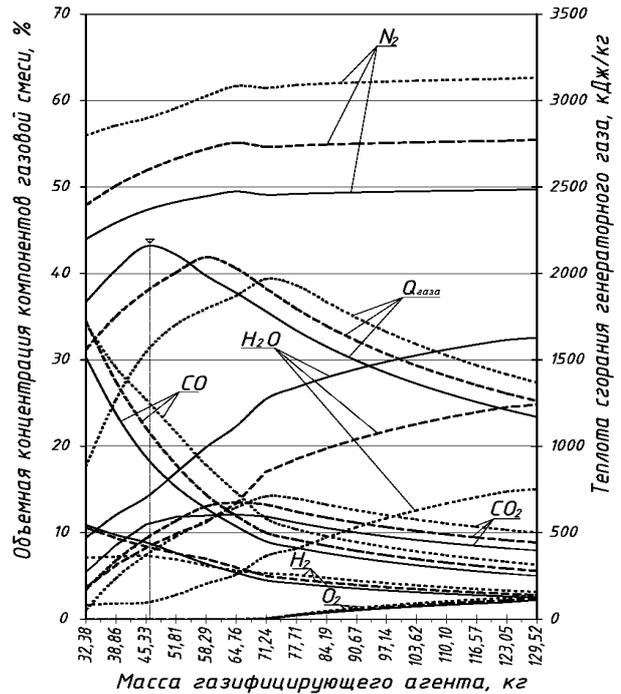


Рис. 1. Состав генераторного газа и его теплотворная способность как функция количества газифицирующего агента на входе в газогенератор:

— — — — — массовая концентрация водяного пара в газифицирующем агенте 26,45%;
 - - - - - массовая концентрация водяного пара в газифицирующем агенте 19,83%;
 - - - - - массовая концентрация водяного пара в газифицирующем агенте 11,9%

С учетом находящегося в газогенераторе топлива и поступающего дутьевого агента, материальный баланс на входе в окислительную зону газогенератора выглядит следующим образом (табл. 5):

Таблица 5
Материальный баланс на входе в окислительную зону газогенератора

Компонент	моль/ч	кг/ч	%, масс.
C	0,699	8,385	13,567
H ₂	0,545	1,090	1,764
CO ₂	0,073	3,210	5,193
H ₂ O	0,404	7,270	11,763
O ₂	0,229	7,343	11,881
N ₂	1,232	34,505	55,831
Σ	3,182	61,803	100,000

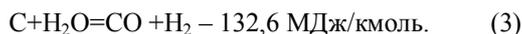
В окислительной зоне газогенератора компоненты топлива и газифицирующего агента взаимодействуют по трем основным реакциям [5, 6].

Кислород, содержащийся в дутьевом агенте, практически сразу расходуется по реакциям:



Параллельно происходит диссоциация воды на углеродном массиве с образованием монооксида

углерода и водорода по реакции:



С учетом кинетики этих реакций, на выходе из окислительной зоны можно получить следующие продукты реакций (табл. 6):

Таблица 6

Материальный баланс на выходе из окислительной зоны газогенератора

Компонент	моль/ч	кг/ч	%, масс.
C	0,123	1,473	2,383
H ₂	0,834	1,668	2,700
CO ₂	0,245	10,782	17,446
H ₂ O	0,115	2,065	3,342
O ₂	0,000	0,000	0,000
N ₂	1,232	34,505	55,831
CO	0,404	11,309	18,298
Σ	2,953	61,803	100,000

Следует отметить, что значительная часть углерода расходуется в окислительной зоне, в то время как количество водорода несколько возрастает за счет диссоциации водяного пара. Это же ведет к появлению на выходе из окислительной зоны значительного количества монооксида углерода. Кислород, в окислительной зоне, расходуется полностью.

Тепловой баланс окислительной зоны, с учетом теплоты, вносимой с отработавшими газами, и паром выглядит следующим образом (табл. 7):

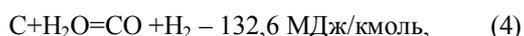
Таблица 7

Тепловой баланс на выходе из окислительной зоны газогенератора

Теплота по реакции 1	67,877	МДж/ч
Теплота по реакции 2	27,766	МДж/ч
Теплота по реакции 3	-48,737	МДж/ч
Теплота, подводимая с газами	11,034	МДж/ч
Теплота, вносимая с паром	2,677	МДж/ч
Σ	60,617	МДж/ч
Температура газов на выходе из окислительной зоны	2158,780	К

Высокая температура на выходе окислительной зоны определяет значительный сдвиг равновесного состояния в сторону реакции диссоциации водяного пара с образованием свободного H₂ и CO [6].

В восстановительной зоне газогенератора протекают две основные реакции, в ходе которых образуется дополнительное количество горючих компонентов смеси [5, 6]:



В нижних слоях восстановительной зоны, где температура еще достаточно высокая, преобладает реакция диссоциации водяного пара, а в верхних слоях реакция разложения диоксида углерода на углеродном массиве с образованием монооксида.

Материальный баланс на выходе из восстановительной зоны, для рассматриваемого случая будет выглядеть следующим образом (табл. 8):

Таблица 8

Материальный баланс на выходе из восстановительной зоны газогенератора

Компонент	моль/ч	кг/ч	%, масс.
C	0,000	0,000	0,000
H ₂	0,896	1,791	2,898
CO ₂	0,184	8,081	13,076
H ₂ O	0,053	0,960	1,554
O ₂	0,000	0,000	0,000
N ₂	1,232	34,505	55,831
CO	0,588	16,464	26,640
Σ	2,953	61,803	100,000

Тепловой баланс восстановительной зоны, поддерживается за счет теплоты, вносимой газами из окислительной зоны (табл. 9):

Таблица 9

Тепловой баланс на выходе из восстановительной зоны газогенератора

Теплота по реакции 4	-7,406	МДж/ч
Теплота по реакции 5	-21,555	МДж/ч
Теплота, подводимая с газами	60,617	МДж/ч
Σ	31,656	МДж/ч
Температура газов на выходе из восстановительной зоны	722,28	К

В результате осуществления процесса, в продукты газификации перейдет около 34% теплоты шламов. Учитывая относительно небольшое количество продуктов газификации (0,078%) по отношению к потребляемому двигателем воздуху, очевидно, их можно подавать на вход без значительного охлаждения, только после предварительной очистки. При использовании генераторного газа во вспомогательном судовом оборудовании (котлах, инснераторах) газы можно направлять прямо в топочное пространство даже без очистки и охлаждения.

Рассмотренный случай организации газогенераторного процесса направлен преимущественно на получение экономического эффекта от возврата теплоты горючих компонентов шламов в энергетический баланс судовой дизельной установки. Малое количество полученного газа не может дать значительного эффекта по снижению выбросов NO_x путем рециркуляции газов и снижения в них содержания кислорода. Однако наличие в камере сгорания дизеля газообразных горючих компонентов таких как H₂ и CO, безусловно, благоприятно повлияет на характер протекания процесса сгорания жидкого топлива.

На рисунке 1 видно, что в генераторном газе свободный кислород отсутствует, пока подача газифицирующего агента не превысит 71 кг/ч. Отсутствие кислорода в генераторном газе, также может

быть критерием при выборе режима газификации, особенно, если основной целью процесса является эффективная рециркуляция с целью улучшения экологических показателей двигателя.

Для эффективного снижения содержания кислорода в рециркулируемых газах доля шламов может быть увеличена путем более частого их сброса. Это, в свою очередь, повысит эффективность очистки топлива. Помимо шламов, образующихся в процессе топливоподготовки, можно использовать шламы, полученные при очистке циркуляционного масла, и другие отходы нефтепродуктов.

Выводы

1. Рассмотренный процесс позволяет за счет газификации шламов вернуть в энергетический баланс судовой дизельной установки до 34% теплоты горючих компонентов, содержащихся в них.
2. Газификация шламов позволит не только использовать часть горючих компонентов шламов в энергетическом балансе судна, но и значительно сократить накопление их на борту.
3. Использование газогенераторной установки в системе рециркуляции отработавших газов позволит понизить содержание в них кислорода, и уменьшить содержание NO_x в отработавших газах. В рассмотренном случае подача в газогенератор до 71 кг/ч сопровождалась полным отсутствием кислорода.
4. С отработавшими газами и паром, получен-

ным за счет теплоты отработавших газов, в газогенератор вносится порядка 13,7 МДж/ч теплоты, необходимой для протекания эндотермических реакций. Эта теплота переходит в энергию химических связей, в результате чего газогенератор выполняет функцию химического регенератора теплоты.

Литература

1. Woodyard, D. *Pounder's marine diesel engines and gas turbines. [Text] / D. Woodyard ; Eighth edition. – Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 200 Wheeler Road, Burlington, 2004. – 914 p.*
2. Возницкий, И. В. *Практика использования морских топлив на судах [Текст] / И. В. Возницкий. – Санкт-Петербург : Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова. 2005. – 123 с.*
3. Белоусов, Е. В. *Судно как источник загрязнения окружающей среды. [Текст] / Е. В. Белоусов, Н. Н. Кобяков // Сучасні проблеми двигунобудування, стан, ідеї, рішення. – Первомайськ : ППІ НУК, 2011. – С. 171-177.*
4. Белоусов, Е. В. *Комплексная утилизация отходов сепарации топлива в судовых энергетических установках [Текст] / Е. В. Белоусов, М. С. Агеев, Н. Н. Кобяков // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 111-114.*
5. Higman, C. *Gasification. Elsevier [Text] / C. Higman, M. Burgt. – 2nd Edition. – Gulf Professional Publishing, 2008 – 456 p.*
6. Дешалит, Г. И. *Расчеты процессов газификации топлива [Текст] / Г. И. Дешалит. – Х. : Изд-во ХГУ им. А. М. Горького, 1959. – 167 с.*

Поступила в редакцию 12.06.2014, рассмотрена на редколлегии 16.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А. В. Букетов, Херсонская государственная морская академия, Херсон.

ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ СЕПАРАЦІЇ ПАЛИВА В ПАЛИВНОМУ БАЛАНСІ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Є. В. Білоусов

Розглянуто комплекс питань, пов'язаних з утилізацією відходів сепарації важких палив шляхом їхньої газифікації й об'єднання процесу газифікації з процесом рециркуляції відпрацьованих газів двигуна. На підставі укрупненої моделі процесів, виконано оцінку матеріального й енергетичного балансів на основних стадіях процесу газифікації при використанні в якості газифікуючого агента суміші відпрацьованих газів двигуна й водяної пари. На основі проведеного аналізу показано технічну виконуваність і економічну доцільність використання комплексної утилізації шламів при експлуатації суднових дизельних установок.

Ключові слова: газифікація, сепарація, шлами, дизельний двигун.

WASTE SEPARATION FUEL USING ENERGY BALANCE SHIP POWER PLANTS

E. V. Belousov

Considered a range of issues related to waste management separation of heavy fuels by gasification and their association with the process of recirculation of the completed gases of the propeller is observed. Based on the model of the processes carried out an assessment of the material and energy balances at the main stages of the gasification process when used as a gasifying agent mixture consisting of exhaust gases and water vapor. Based on the analysis shows the technical feasibility and economic viability of using integrated waste management in the operation of the separation of marine diesel plants.

Keywords: gasification, separation, slimes, the diesel engine.

Белоусов Евгений Викторович – канд. техн. наук, доцент, декан факультета судовой энергетики, Херсонская государственная морская академии, Херсон, Украина, e-mail: ewbelousov@yandex.ru.