

УДК 66.013.8

## ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПО УТИЛИЗАЦИИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ; В.А. ДРОНЧЕНКО  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается проблема выбора технического решения по утилизации нефтесодержащих отходов. Обосновывается техническое решение утилизации нефтесодержащих отходов, включающей их эмульгирование и сжигание вместе с основным топливом в котельном агрегате. Достигнуто снижение в дымовых газах оксида углерода на 75...80% и оксидов азота на 40...45%. Показано, что добавка в виде вторичного энергоресурса из нефтяных фракций позволяет уменьшить потребление основного топлива котельной на 3...5%.*

**Ключевые слова:** отходы, утилизация, эмульгирование, сжигание, вредные выбросы.

Во вспомогательном производстве предприятия нефтехимического комплекса, занятом ремонтом оборудования и транспорта, в течение года образуется до 1 тыс. тонн нефтесодержащих сточных вод в виде отходов технологических процессов: разборочно-очистного, восстановления деталей, обкаточно-испытательного и других. Только загрязнение вод отработавшими нефтяными маслами составляет 20% общего техногенного загрязнения, или 60% загрязнения нефтепродуктами [1; 2]. Слив некачественно очищенных отходов или их бесцельное сжигание наносят непоправимый урон почве и воздушной среде. Большинство применяемых за рубежом процессов утилизации нефтесодержащих отходов осуществляют на дорогостоящем и энергоёмком оборудовании, приобретение которого для большинства малых и средних предприятий с финансовой точки зрения не представляется возможным.

Наиболее эффективными направлениями переработки нефтесодержащих отходов являются те, которые позволяют повторное их использование по новому назначению при безусловном обеспечении требований безопасности труда без загрязнения окружающей среды.

Цель представляемой работы – разработка метода выбора технического решения утилизации нефтесодержащих отходов, исключающего загрязнения почвы и водного бассейна нефтесодержащими сточными водами и уменьшающего массу вредных выбросов котельных установок в воздушный бассейн.

**Материалы, оборудование, приборы, методы.** В исследованиях использовались жидкие отходы производства, образующиеся при разборке и очистке различных агрегатов, восстановлении деталей, работе обкаточно-испытательных стендов и др. Эти отходы включали: масла, смазки, топливные фракции, смазочно-охлаждающие жидкости, промывочные жидкости, отработавшие растворы технических моющих средств (содержащие нефтепродукты) и др. Нефтесодержащая часть отходов состояла из масел моторных (65...90% об.), масел трансмиссионных (6...10% об.), топливных фракций (2...6% об.), пластичных смазок (1...2% об.).

Для экспериментального исследования применялось следующее оборудование: установка для получения нефтесодержащей эмульсии с пневматическим излучателем; хроматограф 3700; анализатор дымовых газов «Testo-350»; платинородиевая термопара ТПР; термоэлектрический пирометр типа ТХА; модель стальной линейки. Использовалось математическое моделирование разрушения поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей при эмульгировании [3] и термического разрушения капель эмульсии в факеле котла [4].

В процессе экспериментального исследования определяли следующие параметры: температуру уходящих газов термоэлектрическим пирометром типа ТХА; температуру среды в факеле котла с помощью термопары ТПР; содержание вредных веществ в продуктах сгорания (оксидов азота, углерода и серы) анализатором дымовых газов «Testo-350»; размеры факела пламени с помощью модели стальной линейки, помещенной в топку котла.

Поиск оптимального технологического процесса выполнен с помощью «морфологического» анализа [5–7] и динамического программирования [8; 9].

**Основная часть.** Необходимость разработки процесса утилизации нефтесодержащих сточных вод нефтехимического комплекса обусловлена: их вредностью на рабочих местах; наличием на производстве большого количества таких отходов в виде вторичных энергоресурсов; высокими требованиями к защите окружающей среды и исключением штрафов за загрязнение почвы, воздушного и водного бассейнов; более низкими затратами, связанными с использованием термического способа утилизации, по сравнению с химическим и биологическими способами; более полным сгоранием топлива в котлах со снижением температуры и длины факела в присутствии капель нефтесодержащей эмульсии, уменьшением выбросов оксидов азота и серы, сажи и других продуктов сгорания в атмосферу.

Технологический процесс утилизации нефтесодержащих отходов производства, который состоит из приготовления нефтесодержащей эмульсии и технологического процесса её использования в качестве добавки к топливу при сжигании в котельных установках (сжигания), представлен на рисунке 1.

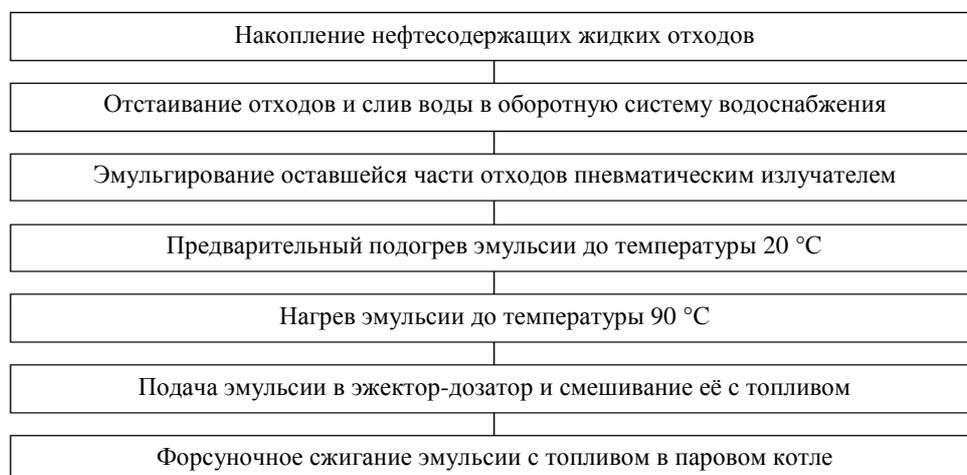


Рисунок 1. – Схема процесса термической утилизации нефтесодержащих стоков

Приготовление нефтесодержащей эмульсии состоит из следующих операций:

- *сбор и подготовка к переработке сточных вод*, содержащих нефтепродукты. Отработавшие нефтесодержащие продукты, а также сточные воды, их содержащие (из очистных сооружений), подавали в бак для отстаивания, затем вода сливалась в обратную систему водоснабжения;

- *подготовка раствора эмульгатора*. В рабочую ёмкость заливалась вода (объем, которой определялся по высоте столба жидкости), затем добавлялся эмульгатор (объем которого измерялся мерной колбой), жидкость перемешивалась до полного растворения эмульгатора с помощью пневматического излучателя. В качестве эмульгатора использовалось техническое моющее средство Лабомид-101 в количестве 3% от объема воды;

- *подача нефтесодержащих отходов в раствор эмульгатора*. Отстоявшиеся нефтесодержащие отходы из бака насосом подавались в рабочую емкость с пневматическим излучателем. Объем жидкости определяли путем замера её глубины в рабочей ёмкости определенного диаметра;

- *подогрев компонентов до температуры 20 °С* при помощи трубчатого электронагревателя;

- *эмульгирование отходов при помощи ударных волн*, излучаемых пневматическим излучателем. Давление подаваемого сжатого воздуха находилось в пределах от 0,4 до 0,6 МПа. Частота импульсов составляла 90 мин<sup>-1</sup> (более высокая частота не дает достаточного импульса каждого удара), продолжительность эмульгирования – 15 минут. Стабильность эмульсии зависит от времени воздействия пневматического излучателя, однако по истечении указанного времени рекомбинация начинает уравнивать диспергирование, и дальнейшее эмульгирование не повышает качество материала;

- *перекачка приготовленной эмульсии*. Приготовленная эмульсия насосом закачивается в сборный бак или в емкости для доставки в котельную. Размеры капель приготовленной эмульсии должны составлять 2...10 мкм. Стабильность эмульсии с содержанием воды 15% при температуре окружающей среды 18 °С поддерживается в течение 30 суток.

Утилизация нефтесодержащей эмульсии путем использования в качестве добавки к топливу при сжигании в котельных состоит из следующих операций:

- доставка и хранение эмульсии в емкости при котельной;

- подогрев эмульсии, подаваемой к паровому котлу, при помощи трубчатого электронагревателя до температуры 20 °С;

- нагрев эмульсии непосредственно перед использованием до температуры 90 °С;

- подача нагретой эмульсии в топку парового котла топливной струей, проходящей через эжектор-дозатор форсунки. Заданное соотношение эмульсия/топливо поддерживалась автоматически при изменении расхода топлива;

- сжигание топливной смеси.

Морфологическая матрица операций процессов приготовления и использования эмульсии из нефтесодержащих отходов в качестве добавки к топливу парового котла приведена в таблице, а соответствующий граф – на рисунке 2. Затраты производственных ресурсов на подготовку и выполнение каждой операции определялись в долях денежной базовой величины (БВ).

Морфологическая матрица составляющих процессов приготовления и использования эмульсии из нефтесодержащих отходов в качестве добавки к топливу парового котла

Операции процессов		Координаты вершин графа (рис. 2)	Затраты, БВ
наименование	исполнение		
Накопление отходов	непрерывное	1а	0,44
	прерывное	1в	0,50
Разделение отходов на фазы	отстаиванием	2а	1,02
	центрофугированием	2г	1,09
Эмульгирование отходов	ударными волнами	3а	10,92
	растиранием	3в	15,13
Предварительный подогрев	электрический	4а	0,17
	паровой	4б	0,21
	огневой	4в	0,37
Нагрев эмульсии	электрический	5а	2,54
	паровой	5б	3,15
	огневой	5в	5,30
Подача эмульсии в дозатор	эжекцией	6а	1,99
	насосом	6в	1,01
Сжигание эмульсии	огневое	7б	0,07

Процедура оптимизации заключалась в следующем [8]: в каком бы состоянии не находилась производственная система в результате определенного числа шагов, последующее управление на ближайшем шаге выбирают таким образом, чтобы оно в совокупности с оптимальным управлением на всех последующих шагах приводило к минимальному расходу производственных ресурсов  $PP$  (в стоимостном выражении) на всех оставшихся шагах, включая данный:

$$PP_{i+1} = \min (\text{по всем вершинам графа}) [PP_i + PP_{(i+1)-1}], \quad (1)$$

где  $i$  – операции процесса;  $PP_{i+1}$  – расход производственных ресурсов при выполнении  $i+1$  операций;  $PP_i$  – расход ресурсов при выполнении  $i$  операций при условии, что соответствующая часть процесса выбрана оптимальным образом;  $PP_{(i+1)-1}$  – расход ресурсов при выполнении  $(i+1)$ -й операции процесса.

Ограничения, касающиеся безопасности труда, исключают контакты движущихся частей устройств, электромагнитных полей, различных излучений, расплавов, кислот и щелочей, электрического тока с частями тела обслуживающего персонала, вредных паров и аэрозолей – с дыхательными путями.

Ограничения, касающиеся охраны окружающей среды, требуют, чтобы отходы предприятия были неактивными и безопасными, т.е. переведены в стабильное состояние веществ, которое они имели до их использования.

Затраты ресурсов отнесены к одной тонне перерабатываемых отходов. Значения длин дуг графа соответствуют указанным затратам и приведены в их разрывах. По существу, это значения затрат ресурсов  $PP_{(i+1)-1}$ , которые входят составной частью в рекуррентное уравнение (1).

Граф, представленный на рисунке 2, имеет ярусы 0...7, из которых ярусы 1, 2 и 3 обозначают операции по приготовлению эмульсии из нефтесодержащих отходов, а ярусы 4...7 определяют сжигания эмульсии с основным топливом в топке парового котла.

Поиск оптимального технологического процесса приготовления эмульсии из нефтесодержащих отходов и ее сжигания следующий. Расчеты начинают с определения минимального значения функции  $PP_{i+1}$  в вершинах предпоследнего 6-го яруса графа, поскольку значения затрат ресурсов  $PP_i$  ниже 7-го яруса графа формально равны нулю.

Рассмотрим вершины 6-го яруса. Сравнение между собой дуг  $6а - 7б$  и  $6в - 7б$  показывает, что они равны по длине. Обозначаем эти дуги стрелками. Значения  $PP_6$  в вершинах 6-го яруса равны 0,07 БВ.

Производили парные сравнения дуг, исходящих из 5-го яруса:  $5а - 6а$  с  $5а - 6в$ ;  $5б - 6а$  с  $5б - 6в$ ;  $5в - 6а$  с  $5в - 6в$ . Более короткие дуги в этих парах:  $5а - 6а$ ;  $5б - 6а$ ;  $5в - 6а$ . Эти дуги ориентируем стрелками.

Аналогичные расчеты и построения подтверждают, что более короткие дуги из четвертого яруса направлены в вершину  $5а$ , из вершин третьего яруса – в вершину  $4а$ , из вершин 2-го яруса – в вершину  $3а$ , из вершин 1-го яруса – в вершину  $2а$ , а из вершины нулевого яруса – в вершину  $1а$ . Более короткие дуги ориентируем стрелками. Значения  $PP_5$  равны 1,08 БВ;  $PP_4 - 3,62$  БВ;  $PP_3 - 3,79$  БВ;  $PP_2 - 14,71$  БВ;  $PP_1 - 15,73$  БВ и, наконец,  $PP_0 - 16,17$  БВ.

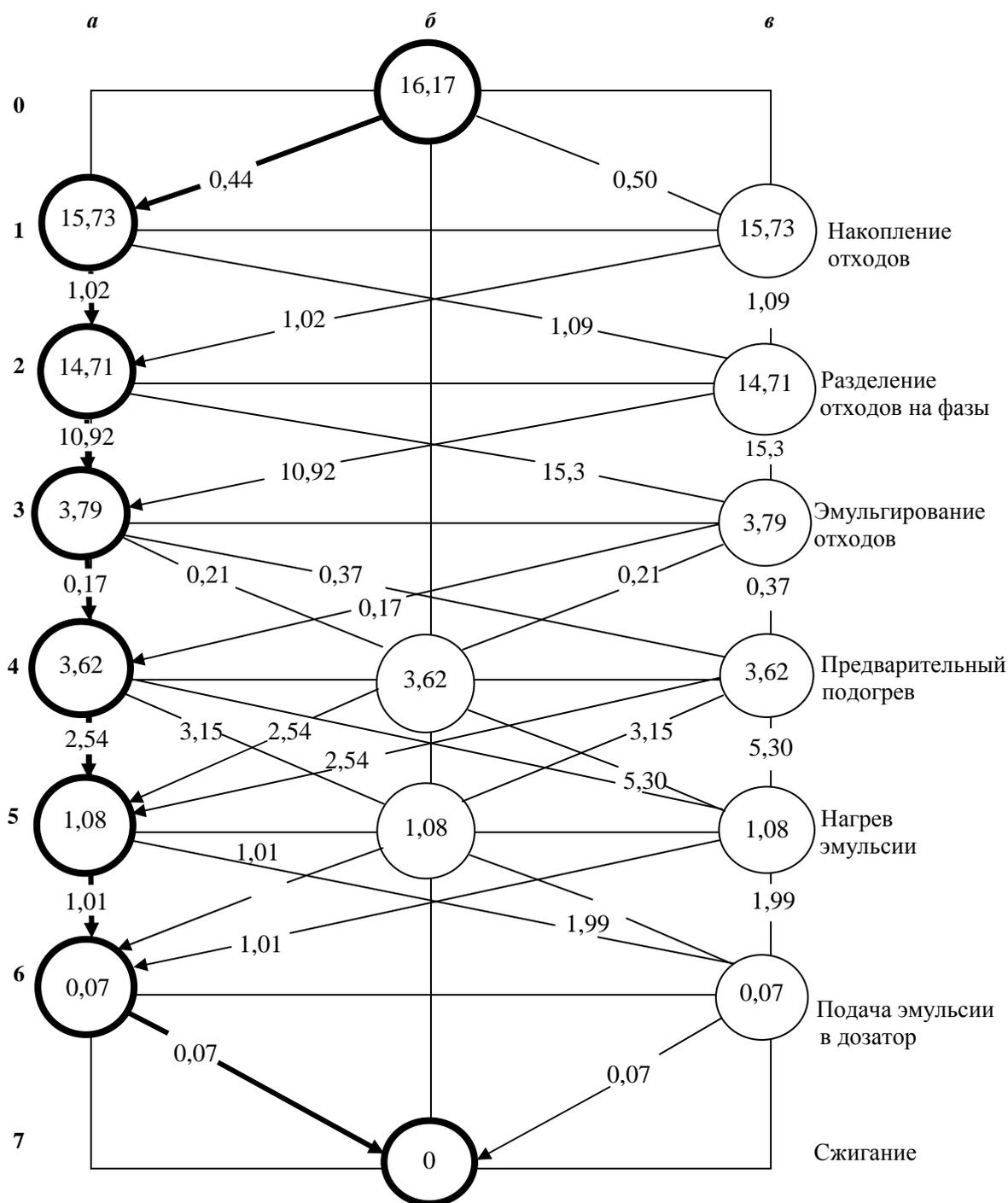


Рисунок 2. – Граф вариантов технологических процессов приготовления и сжигания эмульсии из нефтесодержащих отходов

Оптимизация технологического процесса заключалась в следующем: из числа возможных типов и видов составляющих процесса операций находили такую их последовательность, которая обеспечивает установленные ограничения по безопасности и производительности труда с наименьшими затратами. На стадии структурного синтеза преимущество отдают новым техническим решениям.

Оптимизация решения выражается в поиске кратчайшего пути из вершины *O* в одну из вершин нижнего яруса графа, а, соответственно, подмножество вершин на этом пути определяет содержание оптимального технического решения. Поскольку факторы и параметры оптимизации заданы в целочисленном виде, то оптимальную структуру решения находят с применением динамического программирования.

Следуя сверху вниз в направлении стрелок, получаем оптимальный технологический процесс из вершин графа:  $0b - 1a - 2a - 3a - 4a - 5a - 6a - 7b$ . Операции такого процесса следующие: накопление отходов – непрерывное; разделение отходов на фазы – отстаиванием; эмульгирование нефтесодержащих отходов – ударными волнами, генерируемыми пневматическим излучателем; предварительный и основной нагрев материала – электрический; подача эмульсии в дозатор – насосом под давлением; сжигание эмульсии – огневое. Изменяющееся соотношение затрат на материалы, энергию, заработную плату и появление новых технических решений требуют периодического пересмотра результатов оптимизации.

Расчет индексов риска здоровью работников показал их снижение на 20...30% по сравнению с индексами влиянием веществ в неэмульгированном состоянии, что объясняется распределением слаботоксичных веществ по всему объему материала отходов и уменьшением времени нахождения нефтесодержащих отходов на рабочих местах и в непосредственной близости от них.

Прямые измерения показывают, что сжигание обводненных горючих отходов нефтепродуктов (18% воды) с природным газом при равномерном распределении воды по всему объему материала в котле ДКВР-10-13 обеспечивает снижение выбросов токсичных веществ по сравнению с их количеством при сжигании сухого топлива. Достигнуто уменьшение оксида углерода на 75...80% и оксидов азота – на 40...45%. Горючие добавки в виде вторичного энергоресурса из нефтяных фракций сточных вод позволяют уменьшить потребление основного топлива котельной на 3...5%.

**Заключение.** Предложен метод синтеза технологического процесса, обеспечивающий безопасный труд работников и экологическую безопасность производства, включающий описание в виде графа множества сочетаний технологических операций и отличающийся выбором наилучшего решения с помощью динамического программирования, учетом ограничений по критериям допустимого риска здоровья персонала при минимальном расходе производственных ресурсов. Использование вторичного энергоресурса в виде водной эмульсии из нефтесодержащих отходов и растворов технических моющих средств уменьшает потребление первичного топлива (печного топлива или природного газа) на 3...5% и улучшает экологическую обстановку территорий, прилегающих к котельной установки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тельнов, Н.Ф. Очистка машин и вопросы экологии / Н.Ф. Тельнов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1996. – № 4. – С. 36.
2. Иванов, В.П. Утилизация сточных вод с нефтесодержащими отходами эмульгированием и сжиганием / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2015. – № 4. – С. 141–146.
3. Иванов, В.П. Разрушение поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей при эмульгировании / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестн. БрГТУ. – 2014. – № 4 (88) : Машиностроение. – С. 38–42.
4. Иванов, В.П. Математическое моделирование разрушения капель эмульсии из отходов производства в факеле парового котла / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестн. ГГТУ. – 2016. – № 1. – С. 45–51.
5. Zwicky, F. Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild / F. Zwicky. – München–Zürich : Knaur, 1966.
6. Гончаров, В.А. Методы оптимизации : учеб. пособие для вузов / В.А. Гончаров ; МИЭТ НИУ. – М. : Юрайт, 2014. – 192 с.
7. Панюшева, Л.Н. Исследование операций : учеб. пособие. / Л. Н. Панюшева. Ч. 1 ; РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина ; каф. прикладной математики и компьютерного моделирования. – М. : ИЦ РГУ нефти и газа, 2015. – 210 с.
8. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман ; пер. с англ. – М. : Иностран. лит., 1960. – 400 с.
9. Гринченков, Д.В. Математическая логика и теория алгоритмов для программистов : учеб. пособие для вузов / Д.В. Гринченков, С.И. Потоцкий. – М. : Кнорус, 2014. – 206 с.

Поступила 03.06.2016

#### THE CHOICE OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR THE UTILISATION OF OILY WASTE

V. IVANOV, V. DRONCHENKO

*Justified the technical solution of disposing of oily wastes, including their emulsification and burning along with the main fuel in the boiler unit. Achieved a reduction in the flue gas of carbon monoxide 75...80% and nitrogen oxides by 40...45%. Additive in the form of secondary energy source of petroleum fractions allows to reduce the consumption of primary fuel boiler by 3...5%.*

**Keywords:** waste, recycling, emulsifying, combustion, emissions.