

Как утилизировать обводнённое топливо

Евдокимов А.А., Кисс В.В.
evdokimov@bk.ru

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики.
Институт холода и биотехнологий*

При сжигании обводнённого (до 30-40%) котельного топлива можно утилизировать не более 60% углеводородов. Остальная масса нефтепродуктов выбрасывается с дымовыми газами, загрязняя атмосферу. Чтобы избежать загрязнения атмосферы, обводнённое топливо необходимо предварительно обезвоживать. Разработанная авторами станция обезвоживания обводнённых нефтепродуктов поможет решить эту проблему и получить хорошую прибыль.

Ключевые слова: сжигание обводнённого котельного топлива, загрязнение атмосферы, станция обезвоживания нефтепродуктов.

Сторонники использования обводнённого котельного топлива аргументируют это тем, что затраты на испарение воды, содержащейся изначально в топливе, компенсируются полностью при последующей утилизации теплоты конденсации её паров в поверхностных теплообменниках, где дымовые газы охлаждаются до температуры ниже чем 100°C. Такой довод имеет смысл, если в котельном топливе не содержится серы. Но для высокосернистых сортов нефти, добываемых в России, присутствие серы в мазутах оказывается весьма значительным, и при их сжигании образуется много кислотообразующих окислов серы. При конденсации воды, содержащейся в дымовых газах, окислы серы, взаимодействуют с ней с образованием сильных кислот. По этой причине теплообменные поверхности кожухотрубчатых и пластинчатых теплообменников, предназначенных для утилизации теплоты конденсации водяных паров, подвергаются интенсивной коррозии и быстро выходят из строя.

Учитывая тот факт, что к повсеместной замене теплообменного оборудования котельных установок теплоэнергетический комплекс (ТЭК) пока не готов, мы попытались определить, **как влияет влагосодержание топлива на теоретическую температуру горения и на его приведённую теплотворную способность**, если конденсация водяных паров недопустима.

1. В процессе сжигания обводнённого топлива тепловой эффект реакции горения (Q , Дж) расходуется на испарение балластной воды ($X \cdot m \cdot r$) и увеличение энтальпии (от I_1 до I_2) газообразных продуктов реакции:

$$Q - X \cdot m \cdot r = I_2 - I_1, \quad (1)$$

где m – масса обводнённого топлива, кг; X – массовая доля воды в топливе; r – теплота парообразования Дж/кг.

При полном сгорании углеводородов, содержащихся в обводнённом топливе, тепловой эффект процесса рассчитывают по формуле:

$$Q = m \cdot (1-X) \cdot q, \quad (2)$$

где q – теплотворная способность безводного топлива, Дж/кг.

Разность энтальпий газообразных продуктов при теоретической температуре горения (T_{θ}) и начальной температуре исходной смеси (T_0) определим как

$$I_2 - I_1 = M \cdot C_p \cdot (T_{\theta} - T_0), \quad (3)$$

где M – общая масса реагирующих веществ, кг;

C_p – теплоёмкость продуктов горения, Дж/(кг·К).

Тогда, с учетом выражений 1 – 3 получаем уравнение теплового баланса

$$m \cdot (1-X) \cdot q - X \cdot m \cdot r = M \cdot C_p \cdot (T_{\theta} - T_0), \quad (4)$$

в котором теплоёмкость продуктов горения C_p можно определить, зная их влагосодержание (Y)

$$C_p = C_{сух} \cdot (1 - Y) + C_{вп} \cdot Y, \quad (5)$$

где $C_{сух}$ – теплоёмкость сухих дымовых газов, а $C_{вп}$ – теплоёмкость водяных паров, Дж/кг·К.

Разделив обе части уравнения 4 на M , получим новое уравнение

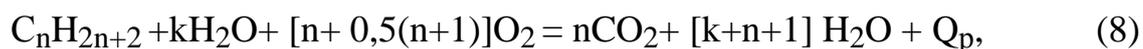
$$q \cdot m \cdot (1-X)/M - r \cdot X \cdot m/M = (T_{\theta} - T_0) \cdot [C_{сух} \cdot (1 - Y) + C_{вп} \cdot Y], \quad (6)$$

решая которое, можно найти теоретическую температуру горения обводнённого нефтепродукта

$$T_{\theta} = \frac{q \cdot m \cdot (1-X)/M - r \cdot X \cdot m/M}{C_{сух}(1 - Y) + C_{вп} Y} + T_0. \quad (7)$$

Чтобы решить уравнение 7, достаточно знать массовые доли балластной воды в исходной смеси ($Y_B = X \cdot m/M$) и углеводородов [$Y_T = m \cdot (1-X)/M$], а в дымовых газах – абсолютное влагосодержание (Y).

2. Процесс горения обводнённых предельных углеводородов можно описать уравнением:



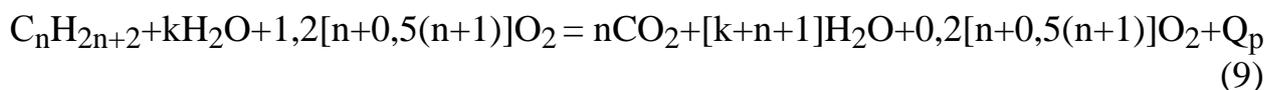
где Q_p – теплота сгорания углеводородов, кДж/моль,

k – число молей воды, приходящееся на моль обводнённых углеводородов.

Эквимольные массы (в к.е.) исходных продуктов из уравнений 8, 1 и 2:

углеводородов –	$14n+2,$
воды (не участвующей в реакции)	$(14n+2) \cdot X/(1-X),$
кислорода –	$48n+16,$
обводнённого топлива	$(14n+2)/(1-X).$

Для полного сгорания топлива воздух в топку подают с избытком. Коэффициент избытка воздуха (с учётом флегматизирующего действия паров воды, изначально присутствующих в зоне горения) поддерживают ~ 1.2 . Тогда количества присутствующих веществ можно определить из выражения:



Чтобы обеспечить требуемый избыток кислорода [$m_O = 1,2 \cdot (48n + 16)$], в топку необходимо подавать воздуха ($m_{\text{возд}}$) с массовой долей в нём кислорода 0,2312:

$$m_{\text{возд}} = 1,2 \cdot (48n + 16) / 0,2312 = \sim 83,045(3n + 1). \quad (10)$$

Тогда общую массу исходных продуктов можно определить условием:

$$M = m + m_{\text{возд}} = (14n + 2) / (1 - X) + 83,045(3n + 1). \quad (11)$$

Масса продуктов реакции та же (M). Общее количество водяных паров в них (m_B) складывается из балластной $(14n + 2) \cdot X / (1 - X)$, реакционной $18 \cdot (n + 1)$ и влаги, поступающей в топку вместе с воздухом [$83,045 \cdot d \cdot (3n + 1)$], где d – абсолютное влагосодержание воздуха, которое принимают ~ 5 г/кг). Тогда:

$$m_B = (14n + 2) \cdot X / (1 - X) + 18 \cdot (n + 1) + 0,005 \cdot 83,045(3n + 1) = \\ = (14n + 2) \cdot X / (1 - X) + 19,2457n + 18,4152. \quad (12)$$

Результаты расчётов количества веществ, присутствующих в зоне горения, тепловых эффектов от сжигания топлива и затрат на испарение балластной воды, теплоёмкости дымовых газов и теоретической температуры горения обводнённого топлива с различным влагосодержанием (X) и различной молекулярной массой ($C_n H_{2n+2}$) представлены в таблице 1.

При расчёте приняты:

теплоёмкость воды $C_B = 4,19$ кДж/кг, теплоёмкость воздуха при постоянном давлении $C_{\text{возд}} \sim 1,05$ кДж/кг, теплота парообразования воды $r_B = 2257$ кДж/кг, теплоёмкость «сухих» дымовых газов $C_{\text{сдг}} = \sim 1,05$ кДж/кг
 q – теплотворная способность безводного топлива (мазут) ~ 40 МДж/кг

3. Приведённую теплотворную способность обводнённого топлива можно рассчитать, учитывая как уменьшение доли углеводородов, так и теплопотери на нагревание и испарение балластной воды:

$$q^* = (1 - X) \cdot q - X \cdot [(100 - 20) \cdot C_B + r], \quad (13)$$

где 100°C – температура кипения воды, 20°C – исходная температура обводнённого топлива.

Подставляя численные значения q , C_B , r в уравнение 13 и проводя необходимые преобразования, получаем формулу для определения расчётной теплотворной способности обводнённого углеводородного топлива при полном его сгорании

$$q^* = 40 - 42,5922 \cdot X \quad (\text{МДж/кг}). \quad (14)$$

Из таблицы 1 следует, что эффективность использования обводнённого топлива даже при условии полного его сгорания значительно ниже его доли в топливе.

4. Однако на практике при сжигании топлива с обводнённостью ~ 40% температура в зоне горения не превышает 1000°C. **Тепловой эффект реакции оказывается в 1,6 – 1,7 раза ниже ожидаемого.** Это означает, что в таких условиях, когда концентрация водяных паров в зоне горения достигает концентрации горючего вещества, эффект **флегматизации** становится весьма значительным, и **доля сгоревшего топлива уже не превышает 59 – 63 %.**

Таблица 1.

Теоретическая температура горения и теплотворная способность обводнённых углеводородов (C_nH_{2n+2})

n	X	Масса угл-ов в топливе, кг	Масса воды в топливе, кг	Масса сухого воздуха, кг	Масса воды в воздухе, кг	Общая масса воды, m_B , кг	Масса влажного воздуха, кг	Общая реакционная масса, M , кг	Доля воды в дымовых газах, Y	C_p , кДж/кг	Доля углеводородов $Y_T = \frac{m \cdot (1-X)}{M}$	Доля балластной воды, $Y_B = \frac{X \cdot m}{M}$	$qY_T - rY_B$ МДж	T_{θ} , °С	q^* , МДж/кг	Ожидаемый коэффициент использования топлива
15	0,1	212	23,56	3820	19,10	330,66	3839	4075	0,081	1,14	0,0520	0,0058	2067	1833	35,74	0,8935
15	0,2	212	53,00	3820	19,10	360,10	3839	4104	0,088	1,15	0,0517	0,0130	2039	1793	31,48	0,7870
15	0,3	212	90,86	3820	19,10	397,96	3839	4142	0,096	1,16	0,0512	0,0219	1999	1743	27,22	0,6805
15	0,4	212	141,13	3820	19,10	448,23	3839	4192	0,107	1,17	0,0506	0,0337	1948	1684	22,96	0,5740
15	0,5	212	212,00	3820	19,10	519,10	3839	4263	0,122	1,19	0,0500	0,0497	1888	1606	18,70	0,4675
20	0,0	282	0,00	5066	25,33	403,33	5091	5373	0,075	1,13	0,0525	0	2100	1878	40,00	1,0000
20	0,1	282	31,33	5066	25,33	434,66	5091	5404	0,080	1,14	0,0522	0,0058	2075	1840	35,74	0,8935
20	0,2	282	70,50	5066	25,33	473,83	5091	5444	0,087	1,15	0,0518	0,0130	2043	1796	31,48	0,7870
20	0,3	282	120,86	5066	25,33	524,19	5091	5494	0,095	1,16	0,0513	0,0220	1999	1743	27,22	0,6805
20	0,4	282	188,00	5066	25,33	591,33	5091	5561	0,106	1,17	0,0507	0,0338	1952	1688	22,96	0,5740
20	0,5	282	282,0	5066	25,33	685,33	5091	5655	0,122	1,19	0,0500	0,0500	1887	1605	18,70	0,4675
25	0,1	352	39,11	6311	31,56	538,67	6343	6734	0,080	1,14	0,0523	0,0058	2079	1843	35,74	0,8935
25	0,2	352	88,00	6311	31,56	587,56	6343	6783	0,087	1,15	0,0519	0,0130	2047	1800	31,48	0,7870
25	0,3	352	150,86	6311	31,56	650,42	6343	6846	0,095	1,16	0,0514	0,0220	2013	1755	27,22	0,6805
25	0,4	352	234,67	6311	31,56	734,23	6343	6930	0,106	1,17	0,0508	0,0339	1956	1692	22,96	0,5740
25	0,5	352	352,00	6311	31,56	851,55	6343	7047	0,121	1,19	0,0500	0,0500	1887	1605	18,70	0,4675
30	0,1	422	46,89	7557	37,79	642,68	7595	8064	0,080	1,14	0,0523	0,0058	2079	1843	35,74	0,8935
30	0,2	422	105,50	7557	37,79	701,29	7595	8122	0,087	1,15	0,0520	0,0130	2051	1803	31,48	0,7870
30	0,3	422	180,86	7557	37,79	776,65	7595	8198	0,095	1,16	0,0515	0,0220	2011	1754	27,22	0,6805
30	0,4	422	281,33	7557	37,79	887,12	7595	8298	0,107	1,17	0,0509	0,0339	1960	1695	22,96	0,5740
30	0,5	422	422,00	7557	37,79	1017,79	7595	8439	0,121	1,19	0,0500	0,0500	1887	1605	18,70	0,4675

Результаты выполненного анализа показывают, что сжигание обводнённого топлива, кроме прямых теплотерь, приводит к интенсивному загрязнению атмосферного воздуха, поскольку до 40% углеводов не сгорает, а теряется с дымовыми газами.

Мы изучили проблему образования обводнённых нефтепродуктов [1], способы их обезвоживания [2] и нашли интересное высокотехнологичное её решение [3]:

- На первой ступени отмывки нефтеналивного и нефтетранспортного оборудования для извлечения нефтяного остатка мы используем не специально приготовленные моющие растворы, а продукты, образовавшиеся от предыдущей промывки [5]. Это позволяет не только резко снизить водопотребление, но и вернуть образующиеся эмульсии в производственный цикл без их полного разделения.

- Образующийся при отмывке углеводородный слой, представляющий собой сильно обводнённые высоковязкие нефтепродукты, мы предварительно нагреваем до температуры 140-145°C (при давлении свыше 0,5 МПа) в автоклаве, что позволяет снизить вязкость смеси и значительно ускорить процесс её расслаивания [6].

- Отсепарированный углеводородный слой в процессе дросселирования мы перегреваем, что позволяет компенсировать потери тепла на испарение воды в отгонном плёночном аппарате специальной конструкции [8].

- Образующиеся на всех стадиях отмывки и обезвоживания водяные пары мы собираем, конденсируем и направляем для споласкивания отмытого оборудования и подпитки моющих растворов [7].

Всё это позволяет отказаться от использования природной воды, как рабочего тела (за исключением компенсации неучтённых потерь), и полностью исключить загрязнение водоёмов, почв и атмосферы нефтепродуктами.

Опытный образец станции обезвоживания нефтепродуктов (СОНеф) [7] был изготовленный в виде пилотной установки с учётом всех перечисленных выше технических решений и успешно прошёл испытания в условиях действующей промывочно-пропарочной станции [4]. А технико-экономический расчёт показал, что затраты на создание СОНеф окупятся через 1,5 – 2 года.

При отмывке нефтеналивного и нефтетранспортного оборудования на железнодорожном транспорте, танкерном флоте и в топливных парках теплоэнергетического комплекса только в России, Казахстане и Украине **ежедневно** образуется около **100 тысяч тонн** обводнённых нефтепродуктов [3]. Сведениями о промышленных масштабах их обезвоживания перед сжиганием мы не располагаем. Почему ни нефтетранспортники, ни теплоэнергетики не спешат внедрять природозащитные энергосберегающие технологии?

Сегодня, не боясь ни экологического, ни отраслевого контроля, им легче добавлять никем не учтённые обводнённые нефтепродукты к товарному топливу и получать «бонусную» прибыль. Никто не штрафует руководство ТЭЦ и котельных за то, что они **ежедневно** выбрасывают в атмосферу **10-20 тыс. т. углеводов**, а удорожание коммунальных услуг и товаров первой необходимости безропотно компенсируют налогоплательщики.

Список литературы:

1. Евдокимов А.А. Очистка нефтеналивного и нефтетранспортного оборудования. Проблемы и решения // Экология и промышленность России. – М.: Изд. ЗАО «Калвис». – 2010, № 2, с. 7 – 9.
2. Евдокимов А.А. Краткий анализ методов и средств обезвоживания вязких нефтепродуктов // Экология и промышленность России. – М.: Изд. ЗАО «Калвис». – 2010, № 3, с. 20-23.
3. Евдокимов А.А. Обводнённые нефтеотходы – значительный энергетический ресурс России. // Экология и промышленность России. – М.: Изд. ЗАО «Калвис». – 2012, ноябрь, с. 19-21.
4. Иоффе О.Б., Евдокимов А.А. Результаты испытаний пилотной установки обезвоживания вязких нефтепродуктов // Экология и промышленность России. – М.: Изд. ЗАО «Калвис». – 2010, № 2, с. 22 – 25.
5. Патент РФ № 2262396. Способ очистки поверхности от углеводородных загрязнений. А.А. Евдокимов, В.А. Евдокимов, Е.А. Евдокимов. БИ № 29, 2005 г.
6. Патент РФ № 2315803 Способ обезвоживания нефтепродуктов А.А. Евдокимов. БИ № 3, 2008
7. Патент РФ № 2327504. Станция обезвоживания нефтепродуктов. А.А. Евдокимов, О.Б. Иоффе, В.И. Матвеев. БИ №18, 2008 г.
8. Патент РФ № 2300408. Отгонный плёночный аппарат. А.А. Евдокимов, БИ № 16, 2007 г

How to utilize the watered fuel

Evdokimov A.A., Kiss V.V.
evdokimov@bk.ru

*Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics.
Institute of Refrigeration and Biotechnologies*

It is possible to utilize not more than 60% hydrocarbons when we try to burn watered about 30-40% viscous fuel. The rest hydrocarbons are evacuated with fume gases (smoke fumes) polluting atmosphere. To avoid atmosphere pollution it is necessary at first to dehumidify the watered fuel. Made by us the watered oil products dehumidification refinery will help to decide the problem and to receive a good profit.

Keywords: burning watered viscous fuel, atmosphere pollution, oil products dehumidification refinery.