

УДК 629.12.03:628.3

Ю.А. Лисняк, доцент, канд. техн. наук, О.Ю. Лисняк*Севастопольский национальный технический университет**Ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ИСПАРИТЕЛЬНОГО КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА
ДЛЯ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ВОД**

Предложена методика теплового расчета производительности испарительного контактного аппарата для обезвреживания нефтесодержащих вод, работающего на отработанных газах судового дизель-генератора. Приведен расчет производительности КТА на номинальном режиме работы дизеля 8ЧН 25/34–3 и предложена формула для определения коэффициента байпасирования, при котором исключается отпотевание и сернокислотная коррозия элементов газохода.

Введение. Предотвращение загрязнения с судов является актуальной задачей в связи с требованиями Международной конвенции MARPOL–73/78, согласно которым содержание нефтепродуктов в сбрасываемой за борт воде не должно превышать 15 млн⁻¹. Обзор по проблемам очистки нефтесодержащих вод показывает всю сложность её решения и недостатки существующих для этой цели технических средств. В судовых условиях наиболее технически простым является метод отстаивания, но его реализация обеспечивает очистку нефтесодержащих вод до 100 млн⁻¹.

Наиболее распространены судовые фильтрационные установки коалесцентного типа, которые являются дорогостоящими и сложными в эксплуатации [1]. Этим объясняется необходимость поиска новых, ранее не применявшихся на судах, методов и разработка на их основе судовых устройств с более приемлемыми техническими характеристиками.

Особое внимание привлекают термические методы благодаря своей глубине обезвреживания нефтесодержащих вод и низким удельным нагрузкам на окружающую среду: например, сжигание нефтесодержащих вод в топках судовых вспомогательных котлов. Однако общий недостаток термических способов – высокая энергоёмкость.

В настоящее время на транспортных морских судах утилизационные котлы, работающие на отработанных газах дизель-генераторов, практически не применяются. Возникает вопрос о целесообразности использования для термического обезвреживания нефтесодержащих вод способа испарения в отработанных газах судовых дизель-генераторов.

Цель статьи – рассмотрение физической модели испарительного КТА, определение условий, при которых достигается полное испарение подпиточной нефтесодержащей воды, ее часовой расход в зависимости от режимов работы дизель-генератора, а также определение значения коэффициента байпасирования газов в обход КТА, при котором исключается отпотевание и сернокислотная коррозия элементов газохода.

Постановка и решение задачи. Вода, контактируя с выпускными газами в контактном теплообменном аппарате (КТА), может быть нагрета до предельной температуры, определяемой температурой мокрого термометра t_m . Процесс испарения, при котором все тепло от выпускных газов идет на испарение воды и пары насыщают сами газы, принято называть адиабатическим испарением. Предельная температура нагрева воды в контактной камере t_m зависит от начальной температуры выпускных газов t_r и разности между влагосодержанием насыщенного водяного пара над пленкой воды d_m и влагосодержанием продуктов сгорания поступающих в контактную камеру d_r [2].

Если температура контактирующей жидкости ниже, чем точка росы водяных паров в газах t_p , то взаимодействие газов с жидкостью условно можно разбить на три стадии.

Первая стадия характеризуется процессом конденсации пара на каплях или пленках и их нагревом с одновременным понижением температуры газов и концентрации пара в них. На этой стадии переносом теплоты за счет диффузии можно пренебречь, так как движущей силой процессов теплопередачи является разность температур между газами и жидкостью, которая вначале достаточно велика, а процессов диффузии – разность парциальных давлений пара в газах и насыщенного пара над холодной поверхностью капель и пленок, которая мала. Первая стадия завершается при равенстве средней температуры капель и пленок точке росы газов t_p .

В случае, когда температуры жидкости выше температуры точки росы, процесс теплообмена начинается со второй стадии.

Вторая стадия характеризуется процессом испарения капель и пленок жидкости с одновременным повышением их температуры. Приток теплоты к поверхности капель и пленок

продолжает осуществляться за счет теплопередачи (движущая сила процесса – разность температур газов и жидкости – еще значительна), причем часть этой теплоты идет на испарение жидкости, а часть на ее нагрев. С повышением температуры жидкости поток теплоты за счет теплопроводности понижается, а за счет диффузии Q_D быстро увеличивается, так как температура капель и пленок связана с парциальным давлением над ними экспоненциальной зависимостью. Отношение уменьшается по мере понижения температуры газов. Завершение второй стадии наступает при равенстве $Q_T = Q_D$.

После этого дальнейший нагрев жидкости становится невозможным, так как вся теплота, получаемая жидкостью от газов за счет теплопередачи, будет возвращаться газам за счет диффузии в виде теплоты пара. Температура жидкости, соответствующая этому процессу, называется температурой мокрого термометра t_m . Температура мокрого термометра является пределом нагрева жидкости при ее соприкосновении с горячими газами.

Возможен вариант, когда температура орошающей жидкости выше температуры мокрого термометра (при подаче на орошение жидкости с высокой температурой). Тогда на этой стадии происходит, охлаждение жидкости до температуры мокрого термометра, сопровождаемое испарением части жидкости.

Третья стадия характеризуется процессом охлаждения газов за счет испарения жидкости.

Такой процесс происходит при постоянной температуре t_m до тех пор, пока вся жидкость не испарится или температура газов не станет равной точке росы t_p водяных паров.

Важное значение при использовании КТА приобретает защита от коррозии металлических поверхностей газохода и штатного глушителя шума. Коррозия вызывается агрессивным воздействием на металл слабоконцентрированной серной кислоты, которая возникает при взаимодействии SO_3 и водяных паров и конденсирующейся при охлаждении отработанных газов до температуры ниже точки росы. Кроме этого коррозия может развиваться под отложениями нагара содержащем кислые соли.

В рассматриваемом случае температуру точки росы не следует отождествлять с температурой металлической поверхности, при которой на поверхности появляется жидкая фаза, поскольку в отработанных газах имеются водяной пар и пары серной кислоты и точка росы соответствует их равновесному состоянию. Конденсация паров серной кислоты H_2SO_4 происходит на поверхности отложений, которая имеет температуру ниже точки росы паров серной кислоты при данном их парциальном давлении. При равенстве этих температур конденсация еще не происходит и начинается при температуре стенки несколько ниже температуры точки росы. Причем концентрация кислоты растет с повышением концентрации серного ангидрида и водяных паров в отработанных газах.

Наиболее интенсивное выпадение H_2SO_4 в большинстве случаев происходит в интервале температур от 105 до 138 °С. Ниже 104 °С – частично в виде аэрозоля, большая его часть удаляется в атмосферу. В результате при температуре ниже 105...110 °С наблюдается снижение количества сконденсированной кислоты. Выше 140 °С H_2SO_4 обычно находится в состоянии перегретого пара. [3]. Поэтому можно считать, что температура точки росы серной кислоты $t_p^{H_2SO_4}$, при которой её пары начнут конденсироваться и выпадать на более холодные стенки газохода имеет значение немногим ниже 140 °С. Чтобы гарантированно избежать даже кратковременного снижения температуры ниже указанного уровня при переходных режимах работы КТА необходимо выполнять условие

$$t_{yx} = t_p^{H_2SO_4} + \Delta t, \quad (1)$$

где $\Delta t = (20...30)$ °С. Для обеспечения этого условия при работе КТА необходимо выполнить следующее:

- часть продуктов сгорания байпасировать мимо КТА с целью подсушки потока газа, насыщенного водяными парами для предотвращения отпотевания и коррозии газохода;
- регулируемая подача распыленной воды в испарительную камеру КТА, чтобы после смешения с газами байпасного потока температура парогазовой смеси должна удовлетворять выражению (1).

Уравнение теплового баланса на режиме полного испарения вводимой в КТА воды, пренебрегая зависимостью теплоемкостей рабочих сред от температуры и потерями тепла конструкций КТА в окружающую среду, можно записать в виде

$$(1 - \theta) G_{c.g} [c_{c.g} t'_g + (r_0 + c_{п} t'_g) d' + c_{н.вод} t_{н.вод} (d'' - d')] = (1 - \theta) G_{c.g} [c_{c.g} t_m + (r_0 + c_{п} t_m) d'']. \quad (2)$$

Здесь θ – коэффициент байпасного обвода газов (минуя КТА); $G_{c.g}$ – массовый расход сухих отработанных газов, кг/ч; $c_{c.g}$ – теплоемкость сухих отработанных газов, Дж/(кг·°С); $c_{п}$ – теплоемкость водяного пара, Дж/(кг·°С); r_0 – скрытая теплота парообразования воды, Дж/кг; t'_g – температура отработанных газов на входе в КТА, °С; $c_{н.вод}$ – теплоемкость воды на подпитку КТА, Дж/(кг·°С); $t_{н.вод}$ – температура воды на подпитку КТА, °С; d' и d'' – абсолютное влагосодержание на входе и выходе КТА, кг/кг.

Тепловой баланс потоков парогазовой смеси из КТА и газов байпасного обвода представлен уравнением

$$\theta G_{c.g.} [c_{c.g.} (t'_r - t_{yx}) + c_n (t'_r - t_{yx}) d'] = (1 - \theta) G_{c.g.} [c_{c.g.} (t_{yx} - t_m) + c_n (t_{yx} - t_m) d''] \quad (3)$$

После преобразований (3) получаем формулу для определения коэффициента байпасирования КТА, при котором достигается его безопасный режим работы согласно (1)

$$\theta = \frac{c_{c.g.} (t_{yx} - t_m) + c_n (t_{yx} - t_m) d''}{c_{c.g.} (t'_r - t_m) + c_n [t'_r d' - t_m d'' + t_{yx} (d'' - d')]} \quad (4)$$

Предельную температуру нагрева воды при полном адиабатном испарении воды, когда наблюдается равенство температуры насыщения t_n и температуры мокрого термометра, можно найти решением равенства (2) методом последовательных приближений. Для этого задаемся величиной t_m и находим соответствующее ей влагосодержание газа d'' на выходе из КТА. Сначала определяется парциальное давление паров P_{2m} в отработанных газах при температуре t_m по формуле Фильнея [4]

$$\lg P_{2m} = \frac{8,12 t_m + 156}{t_m + 236}; \quad P_{2m} = 133,32 \cdot 10^{\lg P_{2m}}, \quad (5)$$

тогда абсолютное влагосодержание газа при температуре насыщения составит

$$d'' = \frac{0,622 P_m}{P_1 - P_m}, \text{ кг/кг}, \quad (6)$$

где $P_1 = P_a + \Delta P_{\text{вых}} = 1,038 \cdot 10^5$ – давление газов на выходе из КТА, Па; $P_a \approx 101325$ Па – атмосферное давление; $\Delta P_{\text{вых}} \leq 2500$ Па – аэродинамическое сопротивление глушителя шума и выпускного участка газохода.

Влагосодержание газов на входе в КТА

$$d' = d_g + d_{\text{мон}},$$

где d_g – влажность атмосферного воздуха на входе в дизель, кг/кг; принимаем $d_g = 0,007$ кг/кг при температуре $t_g = 24^\circ\text{C}$; $d_{\text{топ}} = \frac{9H_{\text{топ}} G_{\text{топ}}}{G_{\text{топ}} + G_b - 9H_{\text{топ}} G_{\text{топ}}}$, кг/кг – увеличение влагосодержания отработанных газов за счет продуктов сгорания топлива; $H_{\text{топ}}$ – доля водорода в топливе; $G_{\text{топ}}$ – расход топлива, кг/с; G_b – расход воздуха, кг/с.

Для дизель-генератора с электрической мощностью 500 кВт, работающего на дизельном топливе, $d_{\text{топ}} = 0,032$ кг/кг [4].

Температура отработанных газов и коэффициент избытка воздуха для четырехтактных дизелей с наддувом изменяются в зависимости от эффективной мощности N_e^H в диапазоне $(0,5...1,0)N_e^H$ по зависимостям, предложенных в [5]

$$t'_e = (0,07 + 0,93 N_e / N_e^H) t_e^H;$$

$$\alpha = \alpha_n (N_e / N_e^H)^{-0,68},$$

где N_e и N_e^H – мощность на режиме и номинальная мощность дизеля соответственно, кВт; t_e^H – температура отработанных газов дизеля после турбокомпрессора на номинальной мощности, $^\circ\text{C}$; α и α_n – коэффициент избытка воздуха на расчетном и номинальном режимах соответственно.

Расход отработанных газов на расчетном режиме

$$G_r = G_g + G_{\text{топ}} = (\alpha L_0 + 1) g_e N_e, \text{ кг/ч}, \quad (7)$$

где L_0 – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кг/кг; g_e – удельный расход топлива, кг/(кВт·ч).

Считаем $G_r = G_{c.g.}$, тогда часовой расход обезвреженной нефтесодержащей воды в КТА, установленном на одном ДГ, составит:

$$G_{\text{н.вод.}} = (1 - \theta) G_r (d'' - d') \text{ , кг/ч.} \quad (8)$$

Режимные параметры на номинальной мощности дизеля 8ЧН 25/34–3, входящего в состав дизель-генератора ДГГА–500/500, необходимые для расчета производительности КТА: номинальная мощность

534 кВт; удельный расход топлива 0,211 кг/(кВт·ч); температура отработанных газов 450 °С; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,1$; теоретическое количество воздуха для сгорания 1 кг воздуха 15,4 кг/кг.

Методом последовательных приближений определяем температуру газа по смоченному термометру. Для этого задаемся ожидаемым значением температуры мокрого термометра $t_{1,м} = 65,3$ °С и находим по формуле (5) парциальное давление пара

$$\lg P_{1,м} = \frac{8,12 \cdot 65,3 + 156}{65,3 + 236} = 2,278;$$

$$P_{1,м} = 133,32 \cdot 10^{2,278} = 2,526 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

Влагосодержание, соответствующее параметрам $t_{1,м}$ и $P_{1,м}$, по формуле (6) равно

$$d'' = \frac{0,622 \cdot 25260}{1,038 \cdot 10^5 - 25260} = 0,200 \text{ кг / кг.}$$

Энтальпия отработанных газов и нефтесодержащей воды на входе в КТА

$$I_{1,м} = c_{с,г} t'_{г} + (r_0 + c_{п} t'_{г}) d' + c_{н,вод} t_{н,вод} (d'' - d') = 1005 \cdot 450 + (2500 \cdot 10^3 + 1884 \cdot 450) \cdot 0,039 + 4190 \cdot 20 \cdot (0,200 - 0,039) = 5,963 \cdot 10^5 \text{ Дж / кг.}$$

Энтальпия парогазовой смеси на выходе из КТА составляет

$$I_{2,м} = c_{с,г} t_{1,м} + (r_0 + c_{п} t_{1,м}) d'' = 1005 \cdot 67,8 + (2500 \cdot 10^3 + 1884 \cdot 65,3) \cdot 0,200 = 5,903 \cdot 10^5 \text{ Дж / кг.}$$

Расчет повторяем при других значениях $t_{1,м}$ до тех пор, пока не станет $I_{1,м} = I_{2,м}$. Это условие достигается с точностью 1,0 % при значениях $t_{1,м} = 65,3$ °С; $d'' = 0,200 \text{ кг / кг}$.

Коэффициент байпасирования на расчетном режиме по формуле (4) составляет

$$\theta = \frac{1005 \cdot (160 - 65,3) + 1884 \cdot (160 - 65,3)}{1005 \cdot (450 - 65,3) + 1884 \cdot [450 \cdot 0,039 - 65,3 \cdot 0,200 + 160 \cdot (0,200 - 0,039)]} = 0,295.$$

Расход отработанных газов на расчетном режиме определяется по формуле (7)

$$G_{г} = (2,1 \cdot 15,4 + 1) \cdot 0,211 \cdot 534 = 3757 \text{ кг / ч.}$$

Подача нефтесодержащей воды на подпитку КТА по формуле (8) составит

$$G_{н,вод} = (0,200 - 0,039) \cdot (1 - 0,295) \cdot (2,1 \cdot 15,4 + 1) \cdot 0,211 \cdot 534 = 426,4 \text{ кг / ч.}$$

Удельный расход нефтесодержащей воды на подпитку КТА равен

$$g_{н,вод} = G_{н,вод} / N_e = 426,4 / 534 = 0,8 \text{ кг / (кВт·ч).}$$

Суточная производительность одного КТА на номинальном режиме дизеля составляет

$$G_{сут}^n = 24 G_{н,вод} = 10,2 \cdot 10^3 \text{ кг / сут.}$$

Мощность судовых дизель-генераторов на эксплуатационных режимах меньше их номинальных значений и наиболее частым являются режимы $0,8 N_e^n$. В данном примере значение производительности КТА на таком режиме составляет: $G_{н,вод}^{0,8} = 288,3 \text{ кг / ч}$; $G_{сут}^{0,8} = 6,9 \cdot 10^3 \text{ кг / сут.}$

Полученные результаты показывают, что при работе хотя бы одного КТА, установленного на газоходе дизель-генератора ДГРА-500/500, его суточная номинальная производительности обеспечивается в соответствии со стандартом Министерства промышленной политики Украины [6] потребность в обезвреживании нефтесодержащих вод сухогрузного судна водоизмещением до 100 тысяч тонн.

Выводы. Получено выражение для определения коэффициента обвода газов мимо КТА для обеспечения коррозионной безопасности участка газохода после КТА. Приведенная оценка суточной производительности испарительного КТА, работающего на выпускных газах от судового дизель-генератора ДГРА-500/500, позволяет утверждать о возможности его использования для обезвреживания нефтесодержащих вод на сухогрузных судах водоизмещением до 100 тысяч тонн.

Задачей дальнейших исследований является определения условий, при которых достигается режим полного испарения воды в КТА, в частности, влияние дисперсности распыляемой воды на его эффективность работы, а также расчеты процесса массообмена и гидродинамического сопротивления аппарата с целью определения его конструктивных размеров.

Библиографический список

1. Истомин В.И. Комплексная очистка судовых нефтесодержащих вод / В.И. Истомин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2004. — 202 с.
2. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер [и др.]. — 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 312 с.
3. Белосельский Б.С. Топочные мазуты / Б.С. Белосельский. — М.: Энергия, 1978. — 256 с.
4. Андреев Е.И. Расчет тепломассообмена в контактных аппаратах / Е.И. Андреев. — Л.: Энергоатомиздат, 1985. — 192 с.
5. Селиверстов В.М. Утилизация тепла в судовых дизельных установках / В.М. Селиверстов. — Л.: Судостроение, 1973. — 256 с.
6. СОУ МПП 47.020–065:2005. Предотвращение загрязнения моря нефтью. Нормы суточного объема накопления судовых нефтесодержащих вод машинных помещений судов и методика расчета пропускной способности систем очистки: Стандарт Министерства промышленной политики Украины. — 2005. — 15 с.

Поступила в редакцию 20.10.2008 г.