

А. К. Ильин, Р. А. Ильин, Т. Р. Горбанов

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Введение

Проблеме использования водотопливных эмульсий (ВТЭ) с момента ее возникновения – более ста лет. Накоплен определенный теоретический и практический системный материал по различным аспектам проблемы [1–30 и др.]. Возможно, как упоминалось в [14] и [28], «впервые добавка воды в нефть для улучшения сгорания была осуществлена в Астраханской губернии». С 20-х гг. 20-го в. в разных странах получено значительное количество патентов по совместному использованию топлива и воды в тепловых двигателях, котлах и др.

Существенные результаты в этой области получили в 30-е и последующие годы С. Я. Корницкий (1935), И. А. Тув (1959), В. М. Иванов (1955, 1962 и далее), I. Cornet (1955), А. Т. Abdelfattch (1957), М. Х. Чичиринский (1960), Б. В. Канторович (1961), Г. Н. Делягин (1962), П. И. Нефедов (1962), Л. В. Сергеев (1965), Y. Ishii (1974), О. Н. Лебедев (1976), F. L. Dryer (1976), А. Я. Исаков, В. А. Корягин, И. Г. Мироненко и др.

Теоретические и экспериментальные основы получения и использования водотопливных эмульсий были созданы в Институт горючих ископаемых Академии наук СССР В. М. Ивановым с сотрудниками [5–7, 18, 21]. В дальнейшем исследования были значительно расширены [1, 3, 11–15, 17, 19 и др.]. «Наиболее обстоятельно вопрос о применении топливоводяных эмульсий для дизелей разработал Л. В. Сергеев» (Астраханский технический институт рыбной промышленности и хозяйства, в настоящее время Астраханский государственный технический университет) [7].

В предлагаемой работе, без технических приложений, кратко рассмотрены некоторые аспекты процессов эффективного использования водотопливных эмульсий при диаметре капель дисперсной фазы (воды) менее 1 мкм.

1. Дисперсность капель воды в ВТЭ

Одним из главных свойств эмульсий является размер (диаметр или радиус) капель воды в каплях ВТЭ. В литературе этот диаметр, как в экспериментах, так и при анализе физических моделей горения ВТЭ, принимается от 1 мкм и существенно выше. При этом имеются определенные трудности в расчетах по определению времени прогрева капель ВТЭ, времени до разрыва капель ВТЭ паровой фазой микрокапель воды и времени сгорания ВТЭ.

С целью уточнения данных по диаметру капель воды нами проведены эксперименты с водомасляной (минеральное масло) эмульсией при ее приготовлении методом перемешивания.

Температура эмульсии в опытах 20–22 °С. Частота вращения мешалки – 12 об/с. Общее время перемешивания – до 20 мин. Измерения диаметров капель проводились с помощью металлографического инвертированного агрегатного микроскопа ЛабоМет-12 с увеличением до 1 000 раз на основе полученных цифровых фотографий. Дальнейшее увеличение изображения достигалось компьютерными манипуляциями с фотографиями. На полученных микрофотографиях видно (рис. 1 в качестве примера), что большинство капель имеет диаметр до 0,05–0,08 мкм. В опубликованных работах приводятся микрофотографии водотопливных эмульсий с диаметрами капель воды более 1 мкм (рис. 2–4).

Можно отметить следующие общие особенности микрофотографий на рис. 1–4:

- спектр капель имеет как полидисперсный, так и почти монодисперсный характер, очевидно – в зависимости от способа приготовления;
- независимо от дисперсности капли не коагулируют даже при минимальном (практически при соприкосновении через микропенку топлива) расстоянии между ними;
- очевидно, что при небольшом диаметре капель (рис. 4 и, особенно, рис. 1) количество капель воды в каплях ВТЭ, вводимых в камеру сгорания котла или теплового двигателя, может быть очень большим (см. ниже), и можно предположить, что капли воды занимают весь объем капли ВТЭ и находятся, в том числе, близко к поверхности или непосредственно под поверхностью последних.

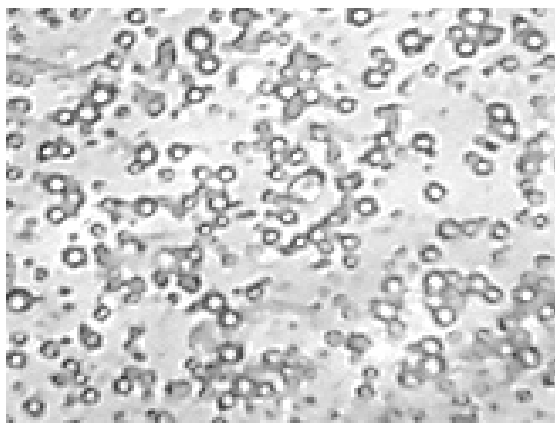


Рис. 1. Фрагмент микрофотографии тонкого слоя эмульсии вода-минеральное масло при массовой доле воды $\beta = 0,1$. Увеличение – 31 600 раз (наши данные). Диаметр капель 0,05–0,08 мкм, расстояние между каплями 0,001–0,30 мкм

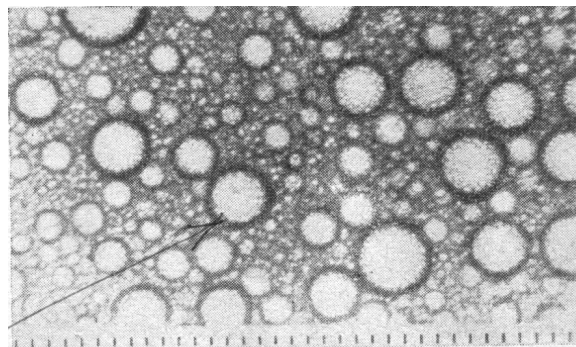


Рис. 2. Микрофотография водотопливной эмульсии вода-дизельное топливо при $\beta = 0,2$. Увеличение – 300 раз [18]. Диаметр капель 5–25 мкм, расстояние между каплями 3–10 мкм

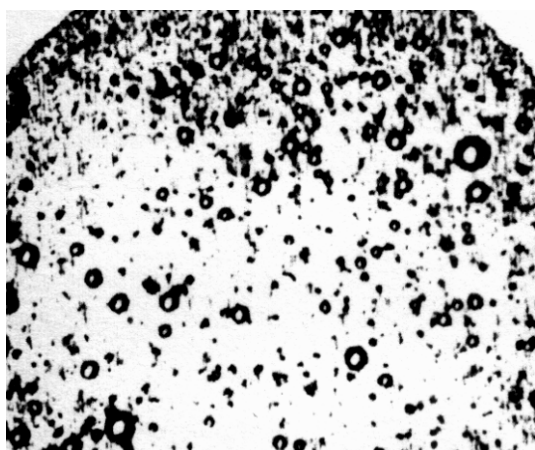


Рис. 3. Микрофотография капель воды в эмульсии вода-дизельное топливо ($\beta = 0,1$). Увеличение – 100 [17]. Диаметр капель 10–30 мкм, расстояние между каплями 3–60 мкм

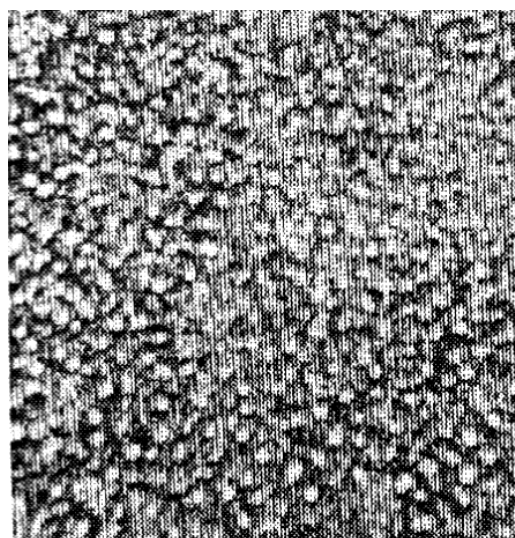


Рис. 4. Микрофотография капель воды в эмульсии вода-керосин ($\beta = 0,25$). Увеличение – 500 [14]. Диаметр капель 3–7 мкм, расстояние между каплями 2–5 мкм

Из опубликованных данных [1–7, 13–15, 17, 18, 22, 24, 26, 27, 29, 30] следует, что капли воды диаметром от 1 мкм и выше в ВТЭ можно получить различными способами (механическим перемешиванием, в гидрокавитаторах, при дополнительном наложении физических полей и др.). Более мелкие капли получают при увеличении кратности циркуляции ВТЭ через эмульгатор и при использовании механических форсунок на последней стадии приготовления ВТЭ.

2. Количество капель воды в капле ВТЭ

В развитие замечания в п. 1 о количестве капель воды в капле ВТЭ, попадающей в камеру сгорания, рассчитано это количество при условиях: диаметр капли ВТЭ = 100 мкм, что соответствует диаметру капель при распыливании ВТЭ котельными форсунками [22, 24 и др.], массовая доля воды в ВТЭ – $\beta = 0,05$ и 0,10, диаметр капель воды $d_k = 1,0, 0,1$ и 0,05 мкм. Расчетные данные приведены в таблице, где количество капель приведено в миллионах штук (с округлениями до 5 %).

Количество капель воды различного диаметра d_k в капле ВТЭ диаметром 100 мкм при $\beta = 0,05$ и $0,1$

β	d_k		
	1,0	0,1	0,05
0,05	0,05	50	400
0,10	0,1	100	800

Цифры таблицы подтверждают упомянутый тезис о том, что и под поверхностью капли ВТЭ находится большое количество мелких капель воды, отделенных от поверхности тонким слоем топлива. Это важно с точки зрения анализа скорости процесса нагрева воды теплопроводностью через эту пленку. Толщину слоя топлива, в котором находятся ближайшие к поверхности капли, вполне обоснованно (в том числе с учетом микрофотографий на рис. 1–4) можно принять равной $\delta_T = 2 \cdot d_k$.

3. Термодинамические параметры капель воды в ВТЭ

Наши данные о том, что можно получать эмульсии с $d_k \ll 1$ мкм, позволяют уточнить физические модели процессов нагревания и разрыва капель при сжигании ВТЭ. В частности, можно показать, что термическое сопротивление топливной пленки вокруг капли воды становится весьма незначительным, а время до разрыва капель составляет не десятые или сотые доли секунды – оно существенно меньше.

Особенностью процесса нагрева капель воды в капле ВТЭ при диаметре капель воды $d_k < 1$ мкм является то, что давление в капле воды достигает значительных величин в связи с межфазным (вода-топливо) поверхностным натяжением. На основе известного соотношения Лапласа запишем:

$$p_k = \frac{2 \cdot \sigma}{r_k \cdot 10^5} + 1, \quad (1)$$

где p_k – давление в капле воды, обусловленное поверхностным натяжением, ата; σ – межфазный (вода-топливо) коэффициент поверхностного натяжения, Н/м, (функция температуры), принимается по [5, 6, 14, 15, 21, 22]; r_k – радиус капли воды, м.

Расчеты по (1) показывают, что это давление может достигать больших величин (рис. 5). При этом температура кипения воды соответственно может составлять 240–290 °С (рис. 6, по справочным данным).

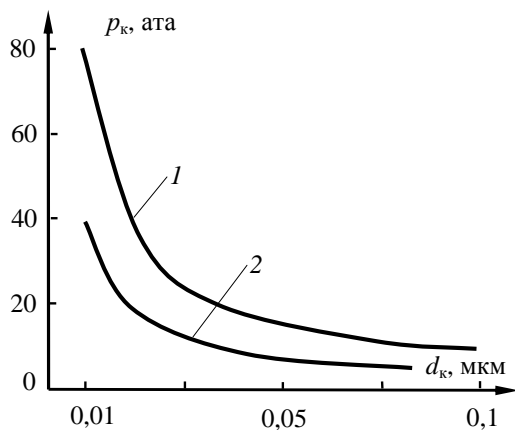


Рис. 5. Зависимость давления в капле воды от размеров капли: 1 – при $\sigma = 0,04$ Н/м; 2 – $0,02$ Н/м

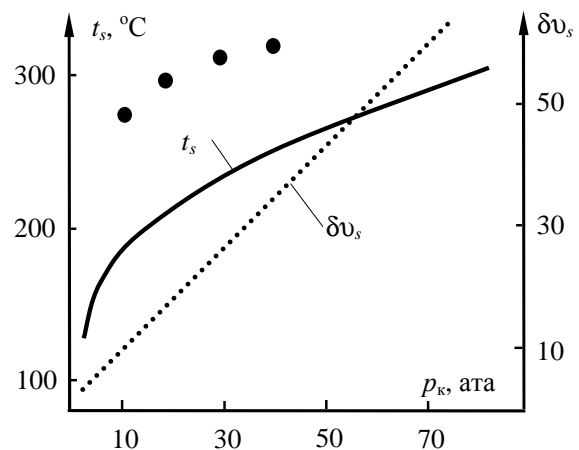


Рис. 6. Температура кипения воды t_s при различных давлениях и отношении удельных объемов насыщенного водяного пара, при температуре кипения v_s , м³/кг, при давлении 1 ата к v_s при давлениях p_k , ата. По справочным данным. Точки – температура капель ВТЭ, достигаемая при нагревании, по обобщениям И. Г. Мироненко [17]

Так как температура кипения топлив в капле ВТЭ, как правило, выше, – более 300 °С, образующийся водяной пар разрывает каплю ВТЭ в большинстве случаев [3], хотя при определенном сочетании параметров (r_k ; σ ; t_s воды и топлива; температура в камере сгорания) парообразование может быть спокойным, без «микровзрыва».

4. Нагревание капель до момента «микровзрыва»

Как следует из п. 2, на скорость нагрева капель воды в капле ВТЭ в условиях камеры сгорания (температура газов 1 500–1 700 °С) положительно влияет то, что каплю воды отделяет от горячих газов небольшая, $\delta_T = 2 \cdot d_k$, пленка топлива. Несмотря на низкий коэффициент теплопроводности топлива [5, 6, 14, 15, 17], ее термическое сопротивление невелико, $(0,5-5,0) \cdot 10^{-6}$ м²·град/Вт, что обеспечивает большие тепловые потоки к капле воды и большую скорость нагревания.

При расчете времени нагревания мелких капель воды мы использовали:

– уравнение теплоотдачи от горячих газов к капле ВТЭ при условии конвективного теплообмена для мелких капель $Nu_T = 2$ и при учете радиационного теплообмена (по величине коэффициента теплоотдачи, которая достаточно велика [14, 16 и др.]);

– уравнение теплопроводности через пленку топлива толщиной $2 \cdot d_k$ при температуре поверхности капли ВТЭ равной температуре ее кипения топлива в условиях камеры сгорания и при максимальной температуре капли, т. е. t_s по рис. 6;

– уравнение теплообмена топлива и находящейся в нем капли воды при $t_{s,T}$ и t_s по рис. 6 при условии теплообмена $Nu_T = 2$ (в соответствии с существующими представлениями [14, 20, 25 и др.]);

– уравнение количества теплоты, необходимой для нагревания капли воды от температуры t_0 до температуры t_s , где t_0 – температура капли ВТЭ, поступающей в камеру сгорания (92–97 °С); t_s – температура кипения воды при давлении p_k в капле (рис. 5 и 6).

Время нагревания капли τ_k входит в правую часть первых трех уравнений.

Расчеты, выполненные на основе этой системы уравнений, показали, что при изменении диаметра капель воды от 1 мкм до 0,05 мкм время нагревания капель уменьшается до тысячных долей микросекунды.

Для крупных капель, как показано в [17 и др.], система уравнений усложняется за счет значительного влияния нестационарных составляющих процесса нагревания, и время процесса увеличивается, как видно на рис. 7, оставаясь, однако, на уровне микросекунд.

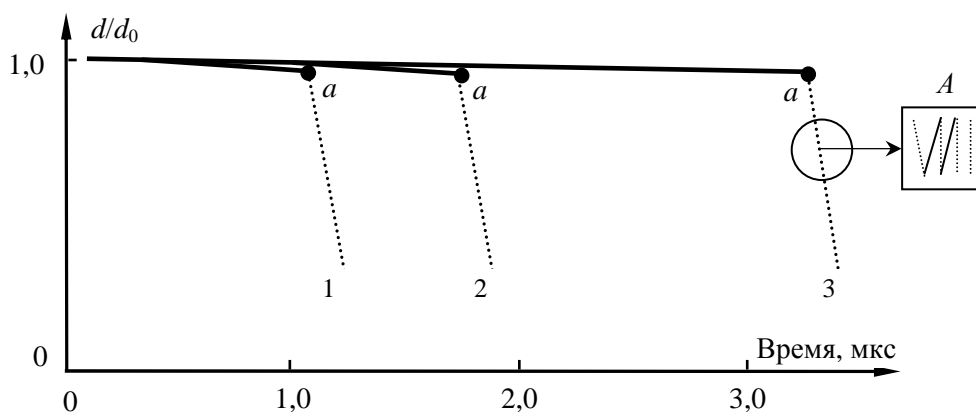


Рис. 7. Продолжительность прогрева капли эмульсии вода-моторное топливо (β до 0,3) от начальной температуры 28 °С при температуре окружающего воздуха 600 °С и давлении 40 ата до первого микровзрыва по теоретической модели в [17]:
 1 – диаметр d_{t_0} капли ВТЭ = 0,56 мм; 2 – 0,7 мм; 3 – 1,0 мм. В квадрате – увеличенное изображение процессов при последующих микровзрывах; d_0 – начальный диаметр капли ВТЭ; d_t – текущий диаметр при нагревании капли. Сплошная линия – нагревание; точка a – «микровзрыв» капли; прерывистая линия – вторичные микровзрывы (показано условно); A – участок a –3 (при увеличении), на котором видно чередование вторичных микровзрывов с повторными процессами нагревания капли

О. Н. Лебедев в [15], на основе собственных экспериментов, приводит формулу для времени нагревания капль ВТЭ (вода-моторное топливо, $\beta = 0,15-0,50$) до момента основного микровзрыва для давлений окружающего газа от атмосферного до 80 ата и температуры газа 380–670 °С. Для атмосферного давления среды (в камере сгорания) формулу запишем применительно к котлам в виде (с дополнительной погрешностью 2–3 %)

$$\tau = 0,25(d_T^2/\lambda_T)(0,117 \cdot T_s - 28)(273/T_T)^{2,7}, \quad (2)$$

где λ_T – коэффициент теплопроводности топлива; T_s – температура кипения воды при давлении в капле p_k , К; T_T – температура газовой среды, К; d_T – диаметр капли ВТЭ, м. Формула (2) дает завышенные результаты по сравнению с расчетами И. Г. Мироненко (рис. 7) и нашими расчетами.

5. О механизме «микровзрыва»

Установившееся представление о механизме микровзрыва капль ВТЭ (нагрев капль воды в ВТЭ до температуры кипения, кипение воды с образованием большого количества пара и, вследствие этого, первого микровзрыва (разрыва) капль ВТЭ, возможные разрывы (взрывы) вторичных капль и несколько последовательных взрывов, как показано на рис. 7) в основном подтверждается теоретическими моделями и экспериментальными данными с каплями более 1 мкм (до 1–3 мм). Очевидно, что в целом механизм микровзрыва будет характерен и для мелких капль, менее 1 мкм – до сотых долей мкм, но, с учетом изложенного в пп. 1–4, перечисленные процессы будут протекать существенно быстрее.

Это подтверждается тем, что нагрев капль происходит при повышенных давлениях, а кипение – при более высоких температурах (см. рис. 5 и 6). В этом случае при кипении капль воды ее объем вместе с паровой оболочкой увеличивается, образовавшийся пар расширяется от давления p_k до $p_{атм}$, увеличивая объем пароводяной смеси капль-пар в 20–50 раз (см. рис. 6), что при большой скорости нагревания капль воды приводит и к большой скорости разрыва капль ВТЭ (первому микровзрыву).

С точки зрения термодинамики расширение пара от p_k до $p_{атм}$ в этом случае можно считать адиабатным процессом расширения, работа которого и затрачивается на разрыв капль. На рис. 8 (по нашим расчетам) приведена величина этой работы, а также доля работы расширения пара (работа микровзрыва) от количества теплоты, затраченной на нагревание капль воды.

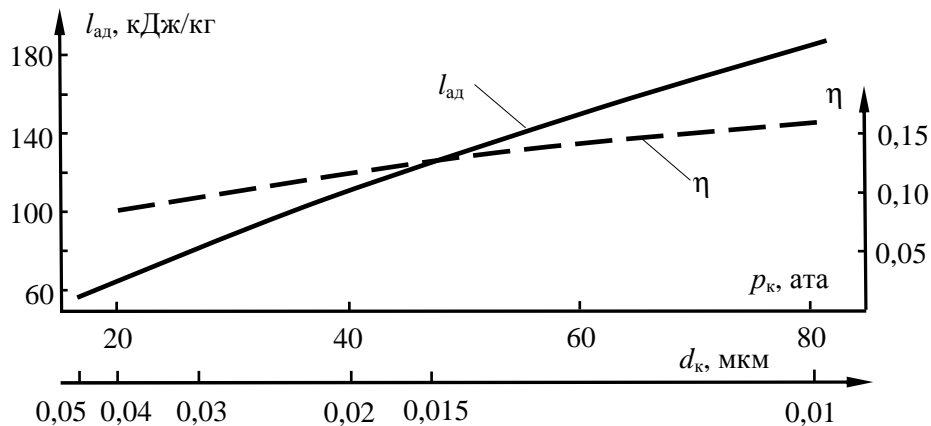


Рис. 8. Работа адиабатного расширения $l_{ад}$, кДж/кг, насыщенного водяного пара при снижении давления от p_k до $p_{атм}$ и доля этой работы от теплоты, которая была затрачена на нагревание воды от 30 °С до температуры кипения при давлении p_k (см. рис. 6)

Таким образом, при нагревании капль воды и ее разрыве осуществляется некоторый термодинамический цикл, теоретический КПД которого составляет 0,05–0,15.

Выводы

Приведенные данные по диаметру капель воды в водотопливных эмульсиях показывают, что при $d_k < 1$ мкм существенно изменяются параметры, важные для использования ВТЭ: увеличивается количество капель воды в ВТЭ, увеличиваются давление внутри капель и температура кипения, принципиально уменьшается время нагрева капель до температуры кипения, существенно увеличивается скорость нагревания капель до кипения и уменьшается время до микровзрыва капель ВТЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воликов А. Н.* Водотопливные эмульсии. – Л.: Недра, 1989. – 160 с.
2. *К вопросу о влиянии впрыска воды на рабочий процесс ДВС* / Ю. А. Волков, Б. Н. Доценко, А. К. Ильин и др. // Использование низкопотенциального тепла: материалы конф. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 1971. – С. 14–18.
3. *Ганиев Р. Ф., Кормилицын В. И., Украинский Л. Е.* Волновая технология приготовления альтернативных видов топлив и эффективность их сжигания. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. – 116 с.
4. *Зройчиков Н. А., Лысков М. Г., Булгаков А. Б.* Исследование и опыт применения водомазутных эмульсий на энергетических котлах ТГМП-314 и ТПМ-96 // Теплоэнергетика. – 2006. – № 6. – С. 31–35.
5. *Иванов В. М.* Топливные эмульсии. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 216 с.
6. *Иванов В. М., Канторович Б. В.* Топливные эмульсии и суспензии. – М.: Металлургиздат, 1963. – 183 с.
7. *Иванов В. М.* Парогазовые процессы и их применение в народном хозяйстве. – М.: Наука, 1970. – 320 с.
8. *Ильин А. К.* Термодинамический цикл четырехтактного ДВС с впрыском воды при выпуске газов // Использование низкопотенциального тепла: материалы конф. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 1971. – С. 19–22.
9. *Ильин А. К., Ильин Р. А.* О максимальной теоретической температуре горения водотопливных эмульсий // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3–4. – С. 8–10.
10. *Ильин Р. А.* Энергетический и эксергетический рейтинги теплоэнергетических установок // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 6 (47). – С. 56–60.
11. *Исаков А. Я.* Моделирование микровзрыва капель водотопливной эмульсии // Изв. вузов. Технические науки. Украина. – 2004. – Вып. 4. – С. 94–97.
12. *Исаков А. Я.* О механизмах фазовых превращений в каплях водотопливной эмульсии // Тр. КубГАУ. – 2006. – № 21 (5) // Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/arkhive.asp?n=21>.
13. *Коноратьев Е. Н., Опятюк В. В., Семенов К. И.* Пульсационный режим испарения капель водотопливных эмульсий при пульсационном режиме // Физика аэродисперсных систем. Украина. – 1969. – Вып. 40. – С. 71–81.
14. *Корягин В. А.* Сжигание водотопливных эмульсий и снижение вредных выбросов. – СПб.: Недра, СПб отд-ние, 1995. – 304 с.
15. *Лебедев О. Н., Сомов В. А., Сисин В. Д.* Водотопливные эмульсии в судовых дизелях. – Л.: Судостроение, 1988. – 108 с.
16. *Липов Ю. М.* Основы топочных процессов. – М.: Энергия, 1969. – 200 с.
17. *Мироненко И. Г.* Особенности эксплуатации судовых дизелей на водотопливной эмульсии. – Новосибирск: Наука, 2005. – 103 с.
18. *Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения.* – М.: Наука, 1972. – 184 с.
19. *Селезнев Ю. С., Лапин А. М.* Основы теории горения эмульгированного гидротоплива. – Владивосток: ДВГТУ, 1994. – 76 с.
20. *Сень Л. И.* Теория горения и взрыва. – Владивосток: ИПК МГУ им. Г. И. Невельского, 2007. – 158 с.
21. *Сергеев Л. В., Иванов В. М.* Применение топливо-водяных эмульсий в двигателях внутреннего сгорания // Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1965. – С. 61–64.
22. *Тув И. А.* Сжигание обводненных мазутов в судовых котлах. – Л.: Судостроение, 1968. – 196 с.
23. *Фокин В. М., Бойков Г. П., Бацура А. В.* Основы теплофизики горения и взрыва. – Волгоград: ВГАСУ, 2007. – 52 с.
24. *Френкель Л. И., Павлов А. В.* Получение и использование водотопливной эмульсии в котельных установках // Судостроительная промышленность. – 1989. – Вып. 9. – С. 20–25.
25. *Хитрин Л. Н.* Физика горения и взрыва. – М.: Изд-во МГУ, 1957. – 445 с.
26. *Dryer F. L., Rambach G. D., Glassman I.* Some preliminary observations on the combustion of heavy fuels and water-in-fuel emulsions // Aerospace and mechanical sciences report / Princeton university, USA. – 1976. – N 1271. – P. 61–66.
27. *Kennelly T. R.* An investigation of the combustion of oil sand derived bitumen-in-water emulsions: dissertation / University of Iowa, USA, 2009 y. – 97 p. /<http://iowa/etd>.

28. *Sjoegren A.* Verbesserte heizolver brennung mit wasser // Oel emulsionen. – Oel + dasfeuerung. – 1978. – Vol. 23, N 3. – P. 148–157.
29. *Walton D. Buffington Sh., Millin J.* Combustion of oil and water-oil emulsion layers supported on water / Pennsylvania State University. Final report by gr.60NANBD0036, 2000 y. – 38 p.
30. *Zwillenberg M. L., Sengupta C., Guerra C. R.* Water-oil emulsion combustion in boilers and gas turbines // Ash deposits and corrosion impur combustion gases. Proc. Int. Conf., Heiniker, 1977. – Washington – London, 1978. – P. 335–355.

Статья поступила в редакцию 14.02.2011

**ON EFFICIENCY OF USE
OF WATER-FUEL EMULSIONS
IN POWER SYSTEMS**

A. K. Ilyin, R. A. Ilyin, T. R. Gorbanov

The basic characteristics of water-fuel emulsions, including experimental data of authors on size of diameter of water drops in emulsions are resulted. On this basis estimation of efficiency of emulsion use is made.

Key words: water-fuel emulsions, characteristics, processes, use, efficiency.