

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА НА ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ КАПЕЛЬ ТОПЛИВА НА ВЫХОДЕ ФОРСУНКИ

Колодяжный Д.Ю.¹, Нагорный В.С.^{2*}, Смирновский А.А.²

¹ Объединенная судостроительная корпорация,
ул. Марата, 90, Санкт-Петербург, 191119, Россия

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого,
СПбПУ, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

* e-mail: nagorny.vladim@jandex.ru

Представлен обзор источников, содержащих сведения о влиянии электрического заряда капель топлива на поверхностное натяжение капель. Впервые получена безразмерная формула зависимости поверхностного натяжения капли топлива от электрического заряда, хорошо отображающая результаты экспериментов.

Ключевые слова: электрический заряд, капля топлива, поверхностное натяжение, форсунка.

Введение

В настоящее время существенно ужесточаются требования к экологической чистоте отработавших газов, выбрасываемых самолетными и автомобильными двигателями [1—3, 42, 43], что наряду с традиционными вопросами повышения экономичности, энергетических, мощностных, динамических показателей реактивных двигателей, двигателей внутреннего сгорания, дизельных двигателей делает эти проблемы весьма актуальными. При этом большое внимание уделяется вопросам выбора оптимальных параметров форсунок для распыла топлива, а также исследованиям влияния электрических и магнитных полей на процесс распыла. В частности, в [4—10] показано, что обработка углеродородного топлива физическими полями может приводить к изменению его свойств, таких, как вязкость и поверхностное натяжение, к увеличению эффективности сгорания топлива. Например, в [5] показано, что наличие заряда уменьшает поверхностное натяжение капель топлива. В [6—9] исследовано влияние постоянного электрического поля на вязкость топлива и показано, что наличие электрического поля приводит к её уменьшению.

В данной работе в рамках прикладных научных исследований рассматривается вопрос о влиянии электрического заряда на поверхностное натяжение капель топлива на выходе форсунки. До этого закрученный поток топлива в форсунке проходит че-

рез резко неоднородное поле между электродами типа «игла — плоскость» и приобретает объемный униполярный электрический заряд знака потенциала игольчатого электрода. При этом принята инжекционная модель сообщения диэлектрическому топливу униполярного заряда [11—13]. На выходе форсунки униполярно заряженный поток топлива распадается на униполярно заряженные капли. Поэтому в данной статье рассматриваются уже униполярно заряженные капли топлива.

Сообщение униполярного электрического заряда знака потенциала острого электрода в резко неоднородном электрическом поле потокам, струям и каплям диэлектрических жидкостей подтверждено и теоретически и экспериментально [14—18].

В [11—13] исследовалась модельная топливная форсунка с электродной системой типа «игла — плоскость», расположенной таким образом, чтобы минимизировать вносимое ею гидравлическое сопротивление. Численно решалась задача переноса заряда закрученным потоком топлива в резко неоднородном электрическом поле. Было установлено, что количество выносимого свободного электрического заряда составляет порядка 80% от инжектируемого с игольчатого электрода.

В процессе распада закрученной струи на выходе форсунки образуются сначала более крупные, а затем мелкодисперсные капли. Основным физи-

ческим механизмом образования капель является неустойчивость струи, в частности в связи с действием сил поверхностного натяжения. Поэтому вопрос о влиянии электрического заряда на поверхностное натяжение капель является актуальным.

Настоящая работа выполнена в рамках прикладных научных исследований. Ее цель — на основании обзорного анализа моделей влияния электрического заряда на поверхностное натяжение капель и имеющихся экспериментальных данных применительно к углеводородному топливу дать аналитические зависимости для дальнейшего инженерного расчета процессов распыла и сгорания углеводородных топлив в двигателях. При этом учитывается отсутствие в научной литературе в теоретических моделях однозначного ответа на вопрос о влиянии электрического поля на поверхностное натяжение жидкости.

Тем более нет такого ответа применительно к углеводородным топливам при анализе процессов распыла и горения топлива, хотя прежде всего в технически развитых странах усилено занимаются этой проблемой, о чем свидетельствуют сотни патентов. Однако в отдельных научных работах, выполненных и успешно защищенных докторских и кандидатских диссертациях изложен ряд результатов экспериментальных исследований влияния электрических полей на физические параметры углеводородного топлива и процессы сгорания топлива в различных двигателях.

Эффект поверхностного натяжения связан с молекулярными силами на границе раздела фаз [19]. Наличие электрического заряда внутри капли при распыле заряженного топлива несколько меняет эти силы. Однако, как показано во многих теоретических (см., например, [20, 21]) и экспериментальных работах, влияние заряда довольно мало. Поверхностное натяжение как молекулярный эффект на границе раздела фаз незначительно меняется при наличии электрического заряда.

В данной статье принимается во внимание действие и кулоновской силы при наличии униполярного заряда капли топлива, который теоретически может быть довольно большим. Наличие этой собственной объемной кулоновской силы внутри капли топлива приводит к появлению поверхностной силы, пытающейся разорвать каплю. Таким образом, при наличии заряда в капле топлива получаем два эффекта: изменение собственного поверхностного натяжения (на молекулярном уровне) и возникновение дополнительной поверхностной силы за счет кулоновского взаимодействия униполярных зарядов в капле. Причём второй эффект может быть заметно сильнее первого.

К сожалению, в экспериментах сложно разделить эти два эффекта, к тому же там ещё есть и внешнее электрическое поле. Вот от него авторы статьи попытались избавиться и, чтобы учесть влияние униполярного заряда в сложных электрофизических процессах, ввели понятие «эффективный коэффициент поверхностного натяжения капль».

Эффективный коэффициент поверхностного натяжения униполярно заряженной капли углеводородного топлива характеризует уменьшение поверхностного натяжения заряженной капли углеводородного топлива прежде всего за счет кулоновских сил относительно поверхностного натяжения незаряженной капли.

При этом рассматривается безразмерная форма отношения эффективного поверхностного натяжения заряженной капли к поверхностному натяжению незаряженной капли. Это отношение записывается как функция отношения текущего заряда капли топлива к критическому заряду капли, который определяется по критерию устойчивости Рэлея. Исходя из известных физических законов возникновения кулоновских сил униполярно заряженной капли и сил поверхностного натяжения, рассматривается предельный (на практике, как правило, недостижимый) случай, когда текущий заряд капли будет равен критическому заряду капли по Рэлею. В этом случае, как известно, капля распадается. То есть силы поверхностного натяжения отдельно взятой капли и кулоновская сила, действующая навстречу силам поверхностного натяжения, будут равны. Гипотетически в данной работе считается, что это соответствует уменьшению эффективного поверхностного натяжения до нуля. Подчёркиваем, что это теоретически возможная (предельная), но практически нереальная ситуация.

Таким образом, в статье речь идет об эффективном коэффициенте поверхностного натяжения, под которым понимается суммарный эффект от изменения собственного (молекулярного) поверхностного натяжения за счёт привнесения заряда и возникающей кулоновской силой, которая по сути действует на элемент поверхности капли. При достижении равенства этих сил (то есть когда величина заряда достаточно велика) произойдёт распад заряженной капли (критерий устойчивости Рэлея заряженной капли), что можно в первом приближении трактовать как уменьшение эффективного коэффициента поверхностного натяжения до нуля.

Именно так трактуется эффективное поверхностное натяжение и в [22—24], в которых получено для некоторых режимов его уменьшение до вели-

чины порядка 0,2 от коэффициента поверхностного натяжения в случае отсутствия заряда.

Модели влияния электрического заряда на эффективное поверхностное натяжение капель

Вопросы о влиянии электрических полей на свойства жидкости и процессы, связанные с её распылом, рассматривались многими исследователями, как теоретически [20, 21], так и, в основном, экспериментально [25—27]. В целом, разные исследователи делают вывод о том, что в результате приложение к диэлектрической жидкости резко неоднородного электрического поля в ней образуется униполярный электрический заряд, который, в свою очередь, влияет на процессы каплеобразования за счёт изменения эффективного коэффициента поверхностного натяжения. Однако до сих пор ясная и непротиворечивая теория, которая бы давала удовлетворительное согласие с экспериментом, не представлена.

В [10, 28] исследовано влияние электризации топлива на качество смесеобразования применительно к форсункам для двигателей внутреннего сгорания, в частности исследовалось влияние электрической обработки топливовоздушной смеси в поле коронного разряда на процесс смесеобразования. В этих работах установлено, что за счёт снижения эффективного поверхностного натяжения бензина в результате электризации капель топлива улучшается качество распыливания.

В [21] при помощи общей теории термодинамики искривленных поверхностей во внешних полях была выведена формула для коэффициента поверхностного натяжения, учитывающая наличие заряда в капле жидкости и присутствие внешнего электрического поля. Однако получаемые по этой формуле изменения поверхностного натяжения для типичных значений радиусов образующихся капель (10—500 мкм) и максимально возможных зарядов капель (рассчитанных по критерию устойчивости Рэлея для заряженных капель) оказываются пренебрежимо малыми. В свою очередь, в ряде других (экспериментальных) работ отмечается, что влияние заряда на эффективное поверхностное натяжение более значительно.

В основном, при исследовании влияния электрического заряда на эффективное поверхностное натяжение капли рассматривались только водяные капли. Например, в [29] методом «вытягивания» капель из капилляра под действием внешнего электрического поля (который также использовался в [22] и будет подробно описан далее) экспериментально исследовалось влияние электрического заряда на поверхностное натяжение капель воды ди-

аметром порядка нескольких миллиметров. В [29] получено уменьшение эффективного поверхностного натяжения до величины около 0,25 от исходного значения коэффициента поверхностного натяжения. При этом рабочее напряжение изменялось до 10 кВ.

Работа [30] посвящена теоретическому вопросу распада капли при зарядах, меньших критических. Отмечается, что при наличии внешнего электрического поля на поверхности капли возникает также индуцированный заряд (в добавление к переносимому каплей заряду, полученному при контакте жидкости с электродами), поэтому распад капли может наступать даже раньше, чем по критерию устойчивости Рэлея.

Среди большого количества работ, посвящённых исследованию формирования капель под действием электрического поля, можно отметить [31—36], в которых также рассматривается вопрос о влиянии электрического заряда на эффективное поверхностное натяжение и делается вывод о возможном его сильном влиянии. К сожалению, в большей части этих работ в качестве рабочей жидкости рассматривается вода, либо представленные данные противоречивы. В данной прикладной научно-исследовательской работе основной интерес представляет именно влияние электрического заряда в случае углеводородного топлива.

В [22—24] проведены экспериментальные исследования по определению поверхностного натяжения бензина. Топливо (бензин) от бачка постоянного давления поступает к отверстию в жиклере и под действием собственного веса вытекает из него. Жиклер, одновременно являющийся и электродом, выполнен в виде усеченного конуса, на нижней части которого формируется капли. Отрыв капли происходит в тот момент, когда сила тяжести становится равной силе поверхностного натяжения, которая удерживает каплю на электроде, или превысит ее. На расстоянии l от жиклер-электрода размещается кольцевой электрод. Отрывающиеся от жиклер-электрода капли считаются и попадают в мерную бюретку для получения одного и того же объема топлива.

Изменение процесса каплеобразования при приложении электрического поля [22] связано с двумя факторами: во-первых, капля топлива в электрическом поле заряжается, поэтому на неё помимо собственного веса действует электрическая (кулоновская) сила $F_э$. Во-вторых, заряд капли способствует собственно изменению эффективной силы поверхностного натяжения $F_с$, которая стремится удержать каплю на жиклер-электроде. Таким обра-

зом, отрыв капли происходит в тот момент, когда $F + F_3 = F_\sigma$.

В описываемых экспериментах заряд капли измеряется непосредственно индукционным методом (регистрация заряда с помощью электрометрического измерителя индукционного заряда, возникающего в кольцевом электроде при пролете через него заряженной частицы). Как отмечается в [26], этот метод позволяет измерить заряды капель топлива в диапазоне $3 \cdot 10^{-15} - 3 \cdot 10^{-10}$ Кл. Помимо индукционного способа измерения заряда капель, в [22] использовался также и способ с использованием ячейки Фарадея, который подходит как раз для измерения относительно больших зарядов капель, например таких, как 339,7 пКл и 387,3 пКл.

В табл. 1 представлены результаты зависимости отношения $\alpha_{эф}/\alpha_0$ (где α_0 — коэффициент поверхностного натяжения в отсутствие электрического поля, $\alpha_{эф}$ — при его наличии) и отношения заряда капли к кубу радиуса капли q/R^3 от значения приложенного напряжения.

Таблица 1

Зависимость эффективного поверхностного натяжения бензина от приложенного напряжения по данным [13]

Напряжение U , кВ	$\alpha_{эф}/\alpha_0$	q/R^3 , мКл/м ³
0	1	0
1	0,811	5,87 – 6,33
2	0,681	13,5 – 13,98
2,5	0,523	20,2 – 20,6
4	0,239	32,4 – 32,9

В [22] эти два фактора не разделяются и считается, что кулоновская сила, возникающая при взаимодействии заряженной капли с внешним электрическим полем, просто изменяет эффективное значение коэффициента поверхностного натяжения $\alpha_{эф}$, поэтому $\alpha_{эф}$ рассчитывается из условия отрыва капли по следующей формуле:

$$\alpha_{эф} = \frac{\rho g V}{2\pi r}$$

Здесь ρ — плотность топлива; g — ускорение свободного падения; V — объём капли; $2\pi r$ — длина окружности нижней части жиклер-электрода (от которого открываются капли).

Данная формула следует из равенства сил, которые записываются в виде

$$F = \rho g V; \quad F_\sigma - F_3 = 2\pi r \alpha_{эф}$$

Поскольку, как предполагается, вне топливной форсунки электрическое поле отсутствует, то необходимо исключить влияние внешнего электрического поля, однако учесть влияние собственного заряда капли на её эффективное поверхностное натяжение. Для этого оценим величину кулоновской силы F_3 , действующей на каплю топлива в электрическом поле, создаваемом используемой в [26] электродной системой.

Электрическое поле, создаваемое между электродами [22], является неоднородным, однако можно пренебречь этой неоднородностью и считать напряжённость как для случая поля между параллельными пластинами. Расстояние между электродами в эксперименте составляет $l = 39$ мм, напряжённость электрического поля $E = U/l$, где U — электрическое напряжение, приложенное к электродам. Обозначим через α_q искомое значение эффективного поверхностного натяжения заряженной капли топлива без учёта действия кулоновской силы во внешнем электрическом поле. Тогда получим следующее соотношение:

$$2\pi r \alpha_q - qE = 2\pi r \alpha_{эф}$$

откуда

$$\frac{\alpha_q}{\alpha_0} = \frac{\alpha_{эф}}{\alpha_0} \left(1 + \frac{qE}{2\pi r \alpha_{эф}} \right) \quad (1)$$

В табл. 2 приведены данные из табл. 1, дополненные рассчитанными на основании (1) значениями α_q/α_0 .

Следует отметить, что в [22] делается также вывод о существовании корреляционной зависимости между эффективным коэффициентом поверхностного натяжения капли топлива и квадратом напряжения, приложенного к электродной системе:

$$\frac{\alpha_{эф}}{\alpha_0} = 1 - \lambda U^2, \quad (2)$$

где λ — эмпирический параметр.

Аналогичный вывод делается в [25], где представлены результаты экспериментов по исследованию влияния заряда на поверхностное натяжение капель воды. В экспериментах использовалась методика, сходная с описанной выше. В [25] предла-

Таблица 2

Сводная таблица, дополненная рассчитанными значениями α_q/α_0

U , кВ	R , мм	q , пКл	q/R^3 , мКл/м ³	$\alpha_{эф}/\alpha_0$	α_q/α_0
0	3,311	0	0	1	1
1	3,088	179,6	6,1	0,811	0,815
2	2,913	339,7	13,74	0,681	0,697
2,5	2,668	387,3	20,4	0,523	0,546
4	2,055	283,3	32,65	0,239	0,266

гается использовать следующую формулу зависимости поверхностного натяжения капль жидкости от электрического напряжения:

$$\frac{\alpha_{эф}}{\alpha_0} = 1 - \frac{U^2}{U_{оп}^2}, \quad (3)$$

где $U_{оп}$ — некоторый уровень напряжения.

Наблюдается полное сходство в формулах (2) и (3), что свидетельствует об одном и том же подходе различных авторов в различных странах к анализу влияния электрического поля на эффективное поверхностное натяжение жидкости. При этом исследования разделены большим промежутком времени. Отметим, что в [29] исследовались капли радиусом около 1 мм.

Приведённые в [22, 25] данные соответствуют относительно большим размерам капль, тогда как в случае распыла топлива из форсунки образующиеся капли имеют гораздо меньший размер. Однако проведенные автором [22] эксперименты по определению влияния электрического поля на характеристики горения в реальном двигателе внутреннего сгорания показывают существенное изменение характеристик процессов горения, что связывается в первую очередь с уменьшением размеров капль в результате приложения электрического поля.

Однако механизм влияния электрического заряда капль топлива на характеристики горения топливно-воздушной смеси с каплями малых диаметров в реальном двигателе внутреннего сгорания очень сложный и многофакторный.

Именно поэтому в настоящей статье делается попытка получить некоторый безразмерный критерий применительно к эффективному коэффициенту поверхностного натяжения, который можно было бы использовать для экстраполяции в область меньших размеров капль топлива. Предложенный на основании проведенного авторами работы обзора критерий, по их мнению, является вполне универ-

сальным. И, как показывает обзор литературы, авторы не одиноки в выборе именно такого критерия.

Сильное влияние электрического заряда на поверхностное натяжение также и для субмикрометровых размеров капль отмечается, в частности, в [26], где рассматриваются заряженные капли воды размером от 1 до 100 нм. Ценность данной работы заключается в том, что авторами предложена корреляционная зависимость коэффициента поверхностного натяжения капль от их заряда в безразмерной форме, что открывает возможность применения этой формулы для разных размеров капль и разных жидкостей. Эта формула, полученная из уравнения Липмана, имеет следующий вид:

$$\frac{\alpha_{эф}}{\alpha_0} = \left(1 + 4 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{кр}} \right)^2 \right)^{-1/2}. \quad (4)$$

Здесь σ — плотность поверхностного заряда капль; $\sigma_{кр}$ — критическая плотность поверхностного заряда, определяемая критерием Рэля устойчивости заряженной капль. Плотность поверхностного заряда капль определяется как $q/(4\pi R^2)$, где R — радиус капль.

В [26] показано, что по крайней мере для мелких капль жидкости предложенная формула даёт хорошее совпадение с экспериментом. При этом отмечается уменьшение относительного коэффициента поверхностного натяжения капль до 30 % при изменении величины Z/R^2 от нуля до 0,027, где Z — количество ионов на поверхности капль.

Несмотря на хорошее совпадение предложенной в [25] формулы (4) с экспериментом, для $\sigma = \sigma_{кр}$ она даёт уменьшение эффективного коэффициента поверхностного натяжения всего примерно в два раза, хотя при такой критической плотности поверхностного заряда капль не может существовать (она

разрывается под действием кулоновских сил). Если рассуждать формально, выражение (4) должно давать уменьшение эффективного поверхностного натяжения до 0 при $\sigma \rightarrow \sigma_{кр}$. Тот факт, что эффективное поверхностное натяжение должно уменьшаться до нуля при приближении к критическому заряду капли, следует из баланса силового равновесия: сила поверхностного натяжения должна уменьшаться за счёт собственной кулоновской силы заряженной капли, т. е. с учетом закона Лапласа для сферической капли можно записать:

$$\Delta p = \frac{2\alpha_0}{R} - \frac{q^2}{32\pi^2\epsilon\epsilon_0 R^4}, \quad (5)$$

где Δp — перепад давления между каплей и внешней средой. Второе слагаемое правой части выражения (5) представляет собой избыточное давление, создаваемое кулоновской силой, которая действует со стороны заряженной сферы на элемент поверхности этой сферы.

Приведем здесь кратко вывод из формулы (5).

Будем рассматривать сферический (бесконечно тонкий) слой, по поверхности которого равномерно распределён электрический заряд с известной плотностью σ . Рассмотрим силу Кулона, действующую на выбранный элемент поверхности со стороны какого-либо другого элемента поверхности на сфере. С учётом наличия внутри сферы топлива с диэлектрической проницаемостью ϵ , сила Кулона запишется в виде

$$\delta^2 \vec{F} = \frac{\sigma^2 \delta S_1 \delta S_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^3} (\vec{r}_1 - \vec{r}_2),$$

где r_1 и r_2 — радиус-векторы двух выбранных элементов на сфере.

Если учесть сферическую симметрию задачи, очевидно, что при интегрировании элементарной силы по всей поверхности сферы будет отлична от нуля только радиальная компонента силы Кулона. Тогда, переходя в сферическую систему координат (полярный угол θ) и ведя интегрирование сферической системе координат (R, θ, φ) , можно записать интеграл для элементарной силы Кулона, действующей на выбранный элемент поверхности со стороны всей сферы:

$$\delta F = \frac{\sigma^2 \delta S_1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R^2 \sin \theta d\theta d\varphi}{(2R \sin(\theta/2))^2} \cos\left(\frac{\pi - \theta}{2}\right) = \frac{\sigma^2}{2\epsilon\epsilon_0} \delta S_1.$$

Отсюда с учётом того, что $\sigma = q/(4\pi R^2)$, следует выражение для давления, создаваемого собственной силой Кулона заряженной сферы:

$$p_q = \frac{\delta F}{\delta S_1} = \frac{q^2}{32\pi^2\epsilon\epsilon_0 R^4}.$$

Отметим, что представленную выше формулу можно также получить из формулы для давления на границе раздела двух диэлектриков $p_q = 0,5\epsilon\epsilon_0 E^2$ [41], если в качестве напряжённости E подставить выражение для напряжённости кулоновского поля на сфере радиусом R , создаваемой точечным зарядом q , помещённым в центре.

Действие собственной кулоновской силы капли можно также трактовать как уменьшение поверхностного натяжения, т.е. ввести величину $\Delta\alpha = \alpha_0 - \alpha_{эф}$ следующим образом:

$$\frac{2\Delta\alpha}{R} = \frac{q^2}{32\pi^2\epsilon\epsilon_0 R^4},$$

откуда следует

$$\Delta\alpha = \frac{q^2}{64\pi^2\epsilon\epsilon_0 R^3}. \quad (6)$$

Критический заряд капли $q_{кр}$ (критерий устойчивости Рэлея) определяется из (5) при $\Delta p = 0$:

$$q_{кр} = \sqrt{64\pi^2\epsilon\epsilon_0 R^3 \alpha_0}. \quad (7)$$

Таким образом, можно считать, что всегда имеет место влияние собственной кулоновской силы капли на её эффективное поверхностное натяжение, Поэтому следует ожидать, что корреляционные формулы для α должны давать нулевое значение при q , стремящемся к $q_{кр}$ (или, что то же самое, при σ , стремящейся к $\sigma_{кр}$).

Эффективное поверхностное натяжения вычисляется по формуле:

$$\alpha_{эф} = \alpha_0 - \Delta\alpha.$$

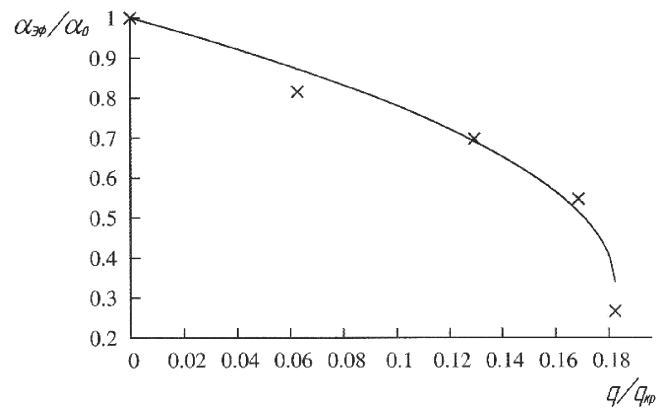
Поделив это выражение на α_0 и воспользовавшись формулами (6) и (7), получим следующее:

$$\frac{\alpha_{эф}}{\alpha_0} = 1 - \left(\frac{q}{q_{кр}}\right)^2. \quad (8)$$

Отметим, что соотношение (6) было положено в основу теоретической части [37—39]. В [40] проведено теоретическое исследование уменьшения поверхностного натяжения заряженной капли топлива в зависимости от электрофизических параметров топлива на базе выражения (6).

Таким образом, сравнивая формулы (4) и (8), можно ожидать, что зависимость эффективного поверхностного натяжения от заряда капли должна иметь следующий вид функциональной зависимости:

$$\alpha_{эф} / \alpha_0 = f(q / q_{кр}).$$



Сопоставление экспериментальных данных (X) [26] о влиянии электрического заряда на поверхностное натяжение каплей углеводородного топлива с результатами расчета по полученной формуле (9)

Таблица 3

Уменьшение поверхностного натяжения заряженной капли в зависимости от электрического заряда капли и диэлектрической проницаемости горючего при радиусе капли $r = 15$ мкм

q , пКл	$\Delta\alpha$, Н/м				
	$\epsilon = 2$	$\epsilon = 2,2$	$\epsilon = 2,4$	$\epsilon = 2,8$	$\epsilon = 3,0$
0	0	0	0	0	0
2	0,106007	0,09637	0,088339	0,081544	0,070671
4	0,424027	0,385479	0,353356	0,326174	0,282684
6	0,95406	0,867327	0,79505	0,733892	0,63604
8	1,696107	1,541915	1,413422	1,304698	1,130738
10	2,650167	2,409243	2,208472	2,03859	1,766778

Выводы

В качестве примера в табл. 3 на базе выражения (6) показано влияние электрического заряда на поверхностное натяжение капли углеводородного топлива при различных диэлектрических проницаемостях топлива.

В настоящей работе для данных из табл. 2 получена аппроксимирующая формула (9), хорошо совпадающая с результатами экспериментальных исследований для бензинов (см. рисунок).

На рисунке обозначены экспериментальные данные [26] и приведен график аппроксимационной зависимости для данных из табл. 2, рассчитанный по формуле

$$\frac{\alpha_{эф}}{\alpha_0} = 1 - 0,67 \left(1 - \sqrt{1 - 5,48 \frac{q}{q_{кр}}} \right). \quad (9)$$

Как следует из рисунка, полученная безразмерная формула зависимости поверхностного натяже-

ния капли топлива от электрического заряда хорошо отображает результаты экспериментов, погрешность аппроксимации составляет не более 5%, что сопоставимо с погрешностью эксперимента (см. табл. 1) и достаточно для инженерных расчетов.

Данные прикладные научные исследования (ПНИ) проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России. Уникальный идентификатор ПНИ REMEFI57714X0087.

Библиографический список

1. Авиационные правила, часть 34. Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания. — М.: Авиаздат, 2003. — 84 с.
2. Охрана окружающей среды. Приложение 16 к конвенции о Международной гражданской авиации. Том II. Эмиссия авиационных двигателей. — Монреаль, Квебек, Канада: Международная организация гражданской авиации, 2008. — 118 с.

3. *Murase Isao, Moriyama Akinobu, Meroji Nakai.* A Portable Fast Response Air-Fuel Ratio Meter Using an Extended Range Oxygen Sensor // SAE Technical Paper Series, 1988, no. 880559, pp. 121-130.
4. *Герловин И.Л.* Основы единой теории всех взаимодействий в веществе. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 431 с.
5. *Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю.* Повышение эффективности сгорания углеводородных топлив // Материалы Международного форума «Крым Hi-Tech-2014», 25-27.09.2014, Севастополь. С. 246-248.
6. *Звонов В.А., Макаров Н.А.* Влияние на рабочий процесс ДВС активирования топлива внешними физическими воздействиями // Двигатели внутреннего сгорания, 2008. № 2. С. 112-121.
7. *Tao R., Du E., Tang H., Xu X.* Neutron scattering studies of crude oil viscosity reduction with electric field // Fuel, 2014. Vol. 134, pp. 493-498.
8. *Du E., Tang H., Huang K., Tao R.* Reducing the Viscosity of Diesel Fuel with Electrorheological Effect // Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011. Vol. 22. No. 15, pp. 1713-1716.
9. *Tao R.* The Physical Mechanism to Reduce Viscosity of Liquid Suspensions // International Journal of Modern Physics B, 2007. Vol. 21, pp. 4767-4773.
10. *Ревзин И.С.* Безмоторное исследование влияния переменного электрического поля на смесеобразование во впускной системе двигателя // Автомобильная промышленность. 1980. № 1. С. 5-7.
11. *Нагорный В.С., Смирновский А.А., Чернышев А.С., Колодяжный Д.Ю.* Перенос заряда в резко неоднородном электрическом поле закрученным потоком жидкости с минимальным гидравлическим сопротивлением // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 17. С. 94-102.
12. *Nagorniy V. S., Smirnovsky A.A., Tchernysheff A.S., Kolodyazhny D.Yu.* Numerical simulation of the flow in the fuel injector in the sharply inhomogeneous electric field // Procedia Computer Science, 2015. Vol. 51, pp. 1219-1228.
13. *Нагорный В.С., Смирновский А.А., Чернышев А.С., Колодяжный Д.Ю.* Исследование процесса переноса зарядов при течении закрученного потока диэлектрической жидкости в резко неоднородном поле // Сборник докладов XI Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики» 29.06.-03.07.2015, Петергоф. — СПб.: ИД «Петроградский», 2015. С. 94-97.
14. *Нагорный В.С.* Электрокаплеструйные регистрирующие устройства. — Л.: Машиностроение, 1988. — 269 с.
15. *Нагорный В.С.* Средства автоматизации гидро- и пневмосистем: учебное пособие для вузов. — СПб., М., Краснодар: Изд-во ЛАНЬ, 2014. — 448 с.
16. *Нагорный В.С.* Электрофлюидные преобразователи. — Л.: Судостроение, 1987. — 251 с.
17. *Денисов А.А., Нагорный В.С.* Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматизации. — Л.: Машиностроение, 1979. — 288 с.
18. *Nagorniy V.S.* Parameter of EHD-Interaction and efficiency Electrohydro(gas) dynamic Control of Flows and Jets of Dielectric Liquids and Gas // International Symposium on Electrohydrodynamics 2014 (ISEHD — 2014. June 23-26). Japan Okinawa. 2014 — 5 p. Book of Abstracts. P. 49.
19. *Оно С., Кондо С.* Молекулярная теория поверхностного натяжения в жидкостях. — М.: Изд-во ИЛ, 1963. — 290 с.
20. *Русанов А.И., Кузьмин В.Л.* О влиянии электрического поля на поверхностное натяжение полярной жидкости // Коллоидный журнал. 1977. Т. 39. № 2. С. 388-390.
21. *Русанов А.И.* К термодинамике нуклеации на загрязненных центрах // Доклады АН СССР. 1978. Т. 238. № 4. С. 831-834.
22. *Ефимов Н.А.* Влияние электрической обработки свежего заряда на показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя: Дисс. на соискание уч. ст. канд. тех. наук. — Ворошиловград, 1984. — 212 с.
23. *Ефимов Н.А., Звонов В.А., Ефимова Л.Я.* Исследование влияния характера прикладываемого напряжения на истечение бензина // Электронная обработка материалов. 1979. № 1. С. 45-47.
24. *Ефимов Н.А., Звонов В.А., Красносельский А.М.* Исследование влияния электрического поля на поверхностное натяжение бензинов при их истечении // Двигатели внутреннего сгорания. Харьков: Изд-во ХГУ, 1978. Вып. 27. С. 40-46.
25. *Kim Y.-J., Ko H.S.* Numerical and Experimental Analysis of Electrostatic Ejection of Liquid Droplets // Journal of Korean Physical Society. 2007. Vol. 51. Pp. 42-46.
26. *Weon B.M., Je J.H.* Ionization-induced surface tension reduction of water droplets // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 93. No. 24. P. 244105.
27. *Lima E.R.A., de Melo B.M., Baptista L.T., Paredes M.L.L.* Specific ion effects on the interfacial tension of water/hydrocarbon systems // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2013. Vol. 30. No. 1. Pp. 55-62.
28. *Ревзин И.С.* Основные предпосылки использования электростатических полей в двигателях внутреннего сгорания // Электронная обработка материалов. 1978. № 6. С. 51-53.
29. *Santos L.P., Ducati T.R.D., Balestrin L.B.S. and Galembeck F.* Water with Excess Electric Charge // Journal of Physical Chemistry C, 2011. Vol. 115. No. 22, pp. 11226-11232.
30. *Shrimpton J.S.* Dielectric charged drop break-up at sub-Rayleigh limit conditions // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005. Vol. 12. No. 3, pp. 573-578.
31. *Schmid G.M., Hurd R.M. & Snavely E.S.* Effect of electrostatic field on the surface tension of salt solution // Journal of The Electrochemical Society. 1962. Vol. 109. Issue 9, pp. 852-858.
32. *Sato M., Kudo N. & Saito N.* Surface tension reduction of liquid by applied electric field using vibrating jet

- method // IEEE Transactions on Industry Applications. 1998. Vol. 34. No. 2, pp. 294-300.
33. *Ahern J.C., Balachandran W.* Experimental electrohydrodynamic nanospray production using drawn glass capillaries // *Particulate Science and Technology*. 2006. Vol. 24. Issue 3, pp. 271-280.
34. *Копейкина Э.К.* Влияние электрического поля на поверхностное натяжение неполярных жидкостей // *Электронная обработка материалов*. 1970. № 4. С. 57-59.
35. *Ревзин И.О.* Экспериментальное исследование влияния переменного электрического поля на поверхностное натяжение жидкостей // *Электронная обработка материалов*. 1975. № 3. С. 28-30.
36. *Boström M., Williams D. R. M. and Ninham B.W.* Surface Tension of Electrolytes: Specific Ion Effects Explained by Dispersion Forces // *Langmuir*. 2001. Vol. 17. No. 15, pp. 4475-4478.
37. *Салимов А.У.* Вопросы теории электростатического распыливания жидкостей и интенсификация процессов сгорания жидких топлив в тепловых двигателях: Автореф. дис. докт. тех. наук. — М.: МАДИ, 1977. — 48 с.
38. *Салимов А.У., Балабеков М.Т., Мамбетов Д.Г., Акбаров М.М.* Электризуемость жидкостей при искусственной электризации // *Известия Академии наук Узбекской ССР. Серия Техническая*. 1977. № 2. С. 30-31.
39. *Салимов А.У., Балабеков М.Т., Мамбетов Д.Г., Акбаров М.М., Уразбаев Ш.Ш.* Методы исследования электризуемости капель различных жидкостей // *Известия Академии наук Узбекской ССР. Серия Техническая*. 1971. № 2. С. 41-43.
40. *Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю.* Естественнонаучные основы повышения эффективности горения углеводородных топлив при их электризации // *Системный анализ в проектировании и управлении: Научные труды XVII Международной научно-практической конференции*. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. Ч. 2. С. 136-138.
41. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества: Учебное пособие для вузов. — М.: Физматлит, 2003. — 616 с.
42. *Колодяжный Д.Ю., Нагорный В.С.* Экспериментальные исследования влияния электрического поля на скорость продуктов сгорания керосино-воздушной смеси // *Вестник Московского авиационного института*. 2016. Т. 23. № 1. С. 56-67.
43. *Колодяжный Д.Ю., Нагорный В.С.* Экспериментальные исследования влияния электрического поля на химический состав продуктов сгорания керосино-воздушной смеси // *Вестник Московского авиационного института*. 2015. Т. 22. № 4. С. 67-74.

ON EFFECT OF ELECTRICAL CHARGE ON FUEL DROPS SURFACE TENSION AT THE ATOMIZER OUTLET

Kolodyazhnyi D.Yu.¹, Nagornyi V.S.^{2*}, Smirnovskii A.A.²

¹ *United shipbuilding Corporation,*

90, Marata str., St. Petersburg, 191119, Russia

² *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,*

29, Polytechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia

* *e-mail: nagorny.vladim@jandex.ru*

Abstract

High-speed transport design, aircraft engines ecology and higher energy efficiency guarantee by improving fuel atomization and air-kerosene mixture quality in aircraft engines intensive research is carried out. To improve fuel atomization and air-kerosene mixture burning we suggest the use properly shaped electric fields in atomizer fuel supplying contours. For the first time the authors studied the effect of variable frequency AC electric field on combustion products chemical composition, when employing kerosene TS-1. Experimental results on the effect of variable frequency AC electric field on air-kerosene mixture combustion products burning rate were presented for the first time.

Post-combustion flow speed measuring at the simulative combustion chamber outlet were carried out at Samara State Aero-space University (SSAU).

Air-fuel mixture combustion products burning speed experimental determination technique was developed at SSAU. It forms the basis of the research on the effect of AC electric field on air-kerosene combustion mixture products speeds.

Employing the speed measuring data, computations of superficial velocity and mass flow ratio were carried out using well-known equations for gas-dynamic functions.

The result of experimentation consists in creating Microsoft Access database file with further possible export to Excel.

Experimental studies were carried out at SSAU on a single-burner bay of a simulative combustion chamber with operational OJSC "Klimov" duplex nozzle for liquid fuel. We employed a swirler with blades angle

$\varphi = 72^\circ 10'$; gas collector with cone outlet diameter of 133 mm; square spacer plate with square cross-section shaped with square side of 180 mm and a baseline case of offset area holes, when mixer apertures were open. Kerosene TS-1 was used as fuel. Low-pressure compressed air was fed under pressure ≤ 0.75 MPa, and solid tracing particles were used for laser measurements of Ch-4 type.

When the AC electric field was applied to kerosene along each diameter, prior to feeding to atomizer, speed values move intermittently up and down. With this, air-kerosene mixture combustion products maximum relative speed reduction was 2.45%, while maximum relative speed of air-kerosene mixture combustion products with applied to kerosene flow AC electric field at the outlet of combustion chamber was 1.425.

Keywords: electric charge, fuel drop, surface tension, atomizer.

References

1. *Aviatsionnye pravila, chast' 34. Okhrana okruzhayushchei sredy. Emissiya zagryaznyayushchikh veshchestv aviatsionnymi dvigatelyami. Normy i ispytaniya* (Aviation rules, part 34. Preservation of the environment. Issue of polluting substances by aviation engines. Norms and tests), Moscow, Aviaizdat, 2003, 84 p.
2. *Okhrana okruzhayushchei sredy. Prilozhenie 16 k konventsii o Mezhdunarodnoi grazhdanskoj aviatsii* (Preservation of the environment. Appendix 16 to the convention on the International civil aircraft). Montreal, Quebec, Canada, Mezhdunarodnaya organizatsiya grazhdanskoj aviatsii, 2008, vol. II, 118 p.
3. Murase Isao, Moriyama Akinobu, Meroji Nakai. A Portable Fast Response Air-Fuel Ratio Meter Using an Extended Range Oxygen Sensor. *SAE Technical Paper Series*, 1988, no. 880559, pp. 121-130.
4. Gerlovin I.L. *Osnovy edinoj teorii vsekh vzaimodeistvii v veshchestve* (Uniform theory of all interactions in substance basics), Leningrad, Energoatomizdat, 1990, 431 p.
5. Nagornyi V.S., Kolodyazhnyi D.Yu. *Materialy Mezhdunarodnogo foruma "Krym Hi-Tech- 2014"*, 25-27.09.2014, Sevastopol, pp. 246-248.
6. Zvonov V.A., Makarov N.A. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2008, no. 2, pp. 112-121.
7. Tao R., Du E., Tang H., Xu X. Neutron scattering studies of crude oil viscosity reduction with electric field. *Fuel*, 2014, vol. 134, pp. 493-498.
8. Du E., Tang H., Huang K., Tao R. Reducing the Viscosity of Diesel Fuel with Electrorheological Effect. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, vol. 22, no. 15, pp. 1713-1716.
9. Tao R. The Physical Mechanism to Reduce Viscosity of Liquid Suspensions. *International Journal of Modern Physics B*, 2007, vol. 21, pp. 4767-4773.
10. Revzin I.S. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 1980, no. 1, pp. 5-7.
11. Nagornyi V.S., Smirnovskii A.A., Chernyshev A.S., Kolodyazhnyi D.Yu. *Pis'ma v ZhTF*, 2015, vol. 41, issue 17, pp. 94-102.
12. Nagorniy V. S., Smirnovskiy A.A., Tchernysheff A.S., Kolodyazhny D.Yu. Numerical simulation of the flow in the fuel injector in the sharply inhomogeneous electric field. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 51, pp. 1219-1228.
13. Nagornyi V.S., Smirnovskii A.A., Chernyshev A.S., Kolodyazhnyi D.Yu. *Materialy XI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Sovremennye problemy elektrofiziki i elektrogidrodinamiki" (29.06.-03.07.2015, Petergof)*, St. Petersburg, Petrogradskii, 2015, pp. 94-97.
14. Nagornyi V.S. *Elektrokaplestruinye registriruyushchie ustroystva* (Electric-drip-jet recorders), Leningrad, Mashinostroenie, 1988, 269 p.
15. Nagornyi V.S. *Sredstva avtomatiki gidro – i pnevmosistem* (Automation equipment for hydraulic and pneumatic systems), St. Petersburg, Moscow, Krasnodar, Lan', 2014, 448 p.
16. Nagornyi V.S. *Elektroflyuidnye preobrazovateli* (Electrofluid converters), Leningrad, Sudostroenie, 1987, 251 p.
17. Denisov A.A., Nagornyi V.S. *Elektrogidro- i elektrogazodinamicheskie ustroystva avtomatiki* (Electrohydro and electro-gas-dynamic automation devices), Leningrad, Mashinostroenie, 1979, 288 p.
18. Nagorniy V.S. Parameter of EHD-Interaction and efficiency Electrohydro(gas) dynamic Control of Flows and Jets of Dielectric Liquids and Gas. *International Symposium on Electrohydrodynamics (2014. June 23-26)*. Japan Okinawa, 2014, 5 p. Book of Abstracts, p. 49.
19. Ono S., Kondo S. *Molekulyarnaya teoriya poverkhnostnogo natyazheniya v zhidkostyakh* (Molecular theory of surface tension in liquids), Moscow, IL, 1963, 290 p.
20. Rusanov A.I., Kuz'min V.L. *Kolloidnyi zhurnal*, 1977, vol. 39, no. 2, pp. 388-390.
21. Rusanov A.I. *Doklady AN SSSR*, 1978, vol. 238, no. 4, pp. 831-834.
22. Efimov N.A. *Vliyanie elektricheskoi obrabotki svezhego zaryada na pokazateli rabocheho protsessa karbyuratornogo dvigatelya* (Inlet gas electric processing effect on carburetor engine working process parameters). Doctor's thesis, Voroshilovgrad, VMI, 1984, 212 p.
23. Efimov H.A., Zvonov V.A., Efimova L.Ya. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1979, no. 1, pp. 45-47.
24. Efimov N.A., Zvonov V.A., Krasnosel'skii A.M. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Sbornik statei*, Kharkov, KhGU, 1978, release 27, pp. 40-46.
25. Kim Y.-J., Ko H.S. Numerical and Experimental Analysis of Electrostatic Ejection of Liquid Droplets. *Journal of Korean Physical Society*, 2007, vol. 51, pp. 42-46.
26. Weon B.M., Je J.H. Ionization-induced surface tension reduction of water droplets. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 93, no. 24, pp. 244105.

27. Lima E.R.A., de Melo B.M., Baptista L.T., Paredes M.L.L. Specific ion effects on the interfacial tension of water/hydrocarbon systems. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2013, vol. 30, no. 1, pp. 55–62.
28. Revzin I.S. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1978, no. 6, pp. 51-53.
29. Santos L.P., Ducati T.R.D., Balestrin L.B.S. and Galembeck F. Water with Excess Electric Charge. *Journal of Physical Chemistry C*, 2011, vol. 115, no. 22, pp. 11226–11232.
30. Shrimpton J.S. Dielectric charged drop break-up at sub-Rayleigh limit conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, vol. 12, no. 3, pp. 573–578.
31. Schmid G.M., Hurd R.M. & Snavely E.S. Effect of electrostatic field on the surface tension of salt solution. *Journal of the Electrochemical Society*. 1962, vol. 109, issue 9, pp. 852-858.
32. Sato M., Kudo N. & Saito N. Surface tension reduction of liquid by applied electric field using vibrating jet method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, vol. 34, no. 2, pp. 294-300.
33. Ahern J.C., Balachandran W. Experimental electrohydrodynamic nanospray production using drawn glass capillaries. *Particulate Science and Technology*, 2006, vol. 24, issue 3, pp. 271-280.
34. Kopeikina E.K. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1970, no. 4, pp. 57-59.
35. Revzin I.O. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1975, no. 3, pp. 28-30.
36. Boström M., Williams D. R. M. and Ninham B.W. Surface Tension of Electrolytes: Specific Ion Effects Explained by Dispersion Forces. *Langmuir*, 2001, vol. 17, no. 15, pp. 4475–4478.
37. Salimov A.U. *Voprosy teorii elektrosticheskogo raspylivaniya zhidkosti i intensivatsiya protsessov sgoraniya zhidkikh topliv v teplovykh dvigatelyakh* (Electrostatic liquids atomizing theory issues and liquid fuels combustion processes intensification in thermal engines). Doctor's thesis, Moscow, MADI, 1977, 48 p.
38. Salimov A.U., Balabekov M.T., Mambetov D.G., Akbarov M.M. *Izvestiya Akademii nauk Uzbekskoi SSR. Seriya Tekhnicheskaya*, 1977, no. 2, pp. 30–31.
39. Salimov A.U., Balabekov M.T., Mambetov D.G., Akbarov M.M., Urazbaev Sh.Sh. *Izvestiya Akademii nauk Uzbekskoi SSR. Seriya Tekhnicheskaya*, 1971, no. 2, pp. 41–43.
40. Nagornyi V.S., Kolodyazhnyi D.Yu. *Materialy XVII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sistemnyi analiz v proektirovanii i upravlenii"*. St. Petersburg, Politekhnikeskii universitet, 2013, ch. 2, pp. 136-138.
41. Tamm I. E. *Osnovy teorii elektrichestva* (Electricity theory fundamentals), Moscow, Fizmatlit, 2003, 616 p.
42. Kolodyazhnyi D.Yu., Nagornyi V.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 56-67.
43. Kolodyazhnyi D.Yu., Nagornyi V.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 67-74.