

03

## Перенос заряда в резко неоднородном электрическом поле закрученным потоком жидкости с минимальным гидравлическим сопротивлением

© В.С. Нагорный<sup>1</sup>, А.А. Смирновский<sup>1,2</sup>, А.С. Чернышев<sup>2</sup>,  
Д.Ю. Колодяжный<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

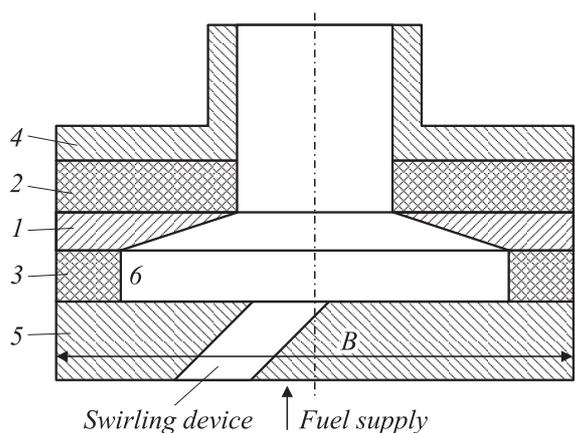
<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: smirta@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2015 г.

Рассматривается схема топливной форсунки с электродной системой типа „игла–плоскость“, расположенной таким образом, чтобы минимизировать вносимое ею гидравлическое сопротивление. Рассматриваются процессы переноса заряда в резко неоднородном электрическом поле с целью установить количество выносимого из канала заряда. Для этого с использованием открытого пакета OpenFOAM, доработанного для учета электрогидродинамических эффектов, в осесимметричном приближении в постановке RANS с использованием модели турбулентности  $k - \omega$  SST рассчитаны течение закрученного потока и перенос электрического заряда. Рассматривается вопрос влияния степени закрутки потока на процессы переноса заряда. Получено, что количество выносимого из расчетной области заряда составляет порядка 80% от количества инжектируемого заряда, степень закрутки в рассмотренном диапазоне ее значений мало влияет на процесс переноса заряда.

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам выбора оптимальных параметров форсунок для распыления топлива применительно к различным приложениям [1]. Для управления параметрами распыления в том числе используются электрические поля [2,3]. При этом наиболее рациональным решением здесь может быть вариант, когда форсунка работает как штатная в случае отсутствия электрического поля, а его включение приводит к улучшению параметров распыления. В этом случае при проектировании подобного рода форсунок необходимо обеспечить требуемый расход топлива при заданном перепаде



**Рис. 1.** Концептуальная схема форсунки с электродной системой: 1 — кольцевой игольчатый электрод, 2, 3 — изоляторы, 4 — электрод типа „плоскость“, 5 — завихритель, 6 — топливный канал.

давления на форсунке, что достигается минимизацией гидравлического сопротивления течения топлива за счет, во-первых, использования закрутки потока (которая, как известно [4], уменьшает гидравлические потери), а во-вторых, путем рационального размещения электродной системы, которая предназначена для сообщения электрического заряда потоку топлива.

В настоящей работе предлагается разместить электроды внутри форсунки таким образом (рис. 1), чтобы они являлись частью канала для течения топлива и не вносили дополнительных гидравлических потерь в закрученный поток. Электрод 1 (см. рис. 1) выполнен в виде кольцевой шайбы с малым внутренним радиусом закругления для создания резко неоднородного электрического поля. В дальнейшем будем его называть „игольчатым“ электродом. Второй электрод 4 выполнен в виде „плоскости с отверстием“. Отметим, что в такой электродной системе типа „игла–плоскость с отверстием“ при приложении к ним высоковольтного напряжения, как показывают многочисленные исследования [5–7], вблизи игольчатого электрода в диэлектрической жидкости возникает униполярный заряд того же знака, что и потен-

циал игольчатого электрода. В данной статье приводятся результаты численного моделирования турбулентного течения закрученного потока топлива (керосина) на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с учетом электрогидродинамических эффектов для определения количества выносимого заряда из форсунки и влияния степени закрутки струи на процесс переноса заряда.

Для учета электрогидродинамического взаимодействия при протекании заряженного потока в электрическом поле используется электростатическое приближение для слабопроводящих сред, к которым относится рассматриваемое топливо [5–7]. Уравнения электрогидродинамики для описания нестационарного турбулентного течения и переноса униполярного заряда в изотермической несжимаемой жидкости могут быть записаны в следующем виде:

$$\nabla \mathbf{V} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho \nabla(\mathbf{V}\mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla[(\mu + \mu_t)\nabla \mathbf{V}] + \rho_e \mathbf{E}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \left( \rho_e \mathbf{V} + b_i \rho_e \mathbf{E} - \left( D_i + \frac{\mu_t}{\rho Sc_t} \right) \nabla \rho_e \right) = 0, \quad (3)$$

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_e}{\epsilon \epsilon_0}, \quad (4)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi. \quad (5)$$

Здесь  $\mathbf{V}$  — вектор скорости среды,  $\rho$  — массовая плотность среды,  $p$  — давление,  $\mu$ ,  $\mu_t$  — коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости,  $\rho_e$  — плотность объемного заряда,  $\mathbf{E}$ ,  $\varphi$  — вектор напряженности и потенциал электрического поля,  $b_i$  — подвижность ионов в жидкости,  $D_i$  — ионный коэффициент диффузии,  $Sc_t$  — турбулентное число Шмидта для ионов,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная. Для определения турбулентного числа Шмидта  $Sc_t$  используется аналогия между переносом ионов в жидкости и переносом примеси, для которой типичное значение  $Sc_t = 0.9$ .

Для замыкания приведенной выше системы уравнений необходимо сформулировать граничные условия и модель турбулентности. Для гидродинамики используются стандартные условия (на входе задается

входной поток, на выходе — фиксированное давление, на стенках ставится условие прилипания). Для границ области, представляющей собой электроды, задается разность потенциалов. Особое внимание необходимо уделить вопросу появления ионов в потоке жидкости вблизи игольчатого электрода.

В настоящее время теория проводимости диэлектрической жидкости до конца не разработана. В литературе по электрогидродинамике обычно рассматриваются две модели образования ионов в потоке диэлектрической жидкости: инжекционная и объемно-диссоциационная [8,9]. В настоящей работе в качестве первого приближения рассматривается только инжекционная модель, в которой плотность потока ионов у поверхности игольчатого электрода задается феноменологической функцией зависимости инжекции от локальной напряженности поля [8,9]. Поскольку в интересующем диапазоне значений напряженности электрического поля функция практически линейна, она может быть записана следующим образом:

$$j_{inj} = \max(AE - B, 0). \quad (6)$$

Здесь  $A$  и  $B$  являются константами, которые берутся из работы [8], где в качестве рабочей диэлектрической жидкости рассматривалось трансформаторное масло.

На противоположном электроде ставится условие нейтрализации всех зарядов, попадающих на электрод. Для определения коэффициента турбулентной вязкости используется модель турбулентности  $k - \omega$  SST [10].

Численное моделирование проводилось при помощи открытой вычислительной платформы OpenFOAM версии 2.3. Представляемые ниже результаты получены с помощью модифицированной программы `rhoFoam`, в которой были добавлены уравнения для электрического поля и переноса заряда (3)–(5). Для аппроксимации конвективных потоков на гранях конечного объема (в качестве которого в большей части расчетной области выступают шестигранники) в уравнении движения используется схема второго порядка SFCD, аналогичная центрально-разностной для гладких решений.

Для того чтобы исследовать влияние параметров закрутки потока на процессы переноса заряда, была сформулирована задача о течении

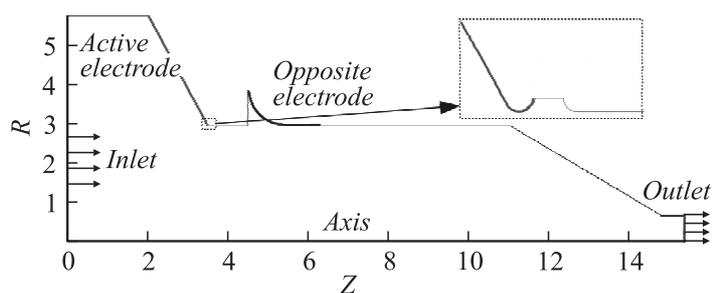


Рис. 2. Геометрия расчетной области и расположение электродов.

топлива в форсунке с учетом электрогидродинамического взаимодействия закрученного заряженного потока в электрическом поле в осесимметричном приближении. Как отмечено ранее, электроды расположены внутри форсунки таким образом, чтобы минимизировать вносимое ими дополнительное гидравлическое сопротивление (рис. 1, 2). В рассматриваемом случае возникает поток униполярных ионов от игольчатого электрода к электроду типа „плоскость с отверстием“.

Свойства рабочей жидкости между электродами соответствуют свойствам керосина: плотность  $\rho = 780 \text{ kg/m}^3$ , динамический коэффициент вязкости  $\mu = 1.014 \cdot 10^{-3} \text{ P} \cdot \text{s}$ , относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 2.2$ . Подвижность ионов в рабочей жидкости бралась равной  $b_i = 10^{-8} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , ионный коэффициент диффузии  $D = 2.5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Задавались следующие граничные условия. На всех твердых стенках (в том числе и электродах) для скорости потока задавалось условие прилипания. На игольчатом электроде задавались постоянный потенциал электрического поля, равный приложенному к электродам напряжению 15 kV, инжекционный поток ионов в соответствии с выражением (6) со следующими значениями констант:  $A = 6.409 \cdot 10^{-10} \text{ C}/(\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$ ,  $B = 3.204 \cdot 10^{-3} \text{ C}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . На противоположном электроде типа „плоскость с отверстием“ выбирался нулевой потенциал электрического поля и задавалось условие нейтрализации заряда. На выходе из расчетной области задавалось фиксированное давление.

На входе задавались профили скорости для закрученного потока топлива, полученные из предварительного трехмерного расчета с учетом завихрителя потока

$$V_{\varphi}(R) = V_{\varphi 0} + 5.6 \exp(-(R - 2.06 \cdot 10^{-3})^2 / 10^{-7}) \text{ m/s}, \quad (7)$$

$$V_z(R) = 1.8585 \exp(-(R - 2.06 \cdot 10^{-3})^2 / 7 \cdot 10^{-8}) \text{ m/s}, \quad (8)$$

$$V_R = 0 \text{ m/s}.$$

Значение постоянной скорости закрутки потока  $V_{\varphi 0}$  в формуле (7) варьировалось в диапазоне 1–4 м/с для задания разной степени закрутки потока, которая рассчитывалась по формуле

$$J = V_{\varphi \max} / V_{z \max}$$

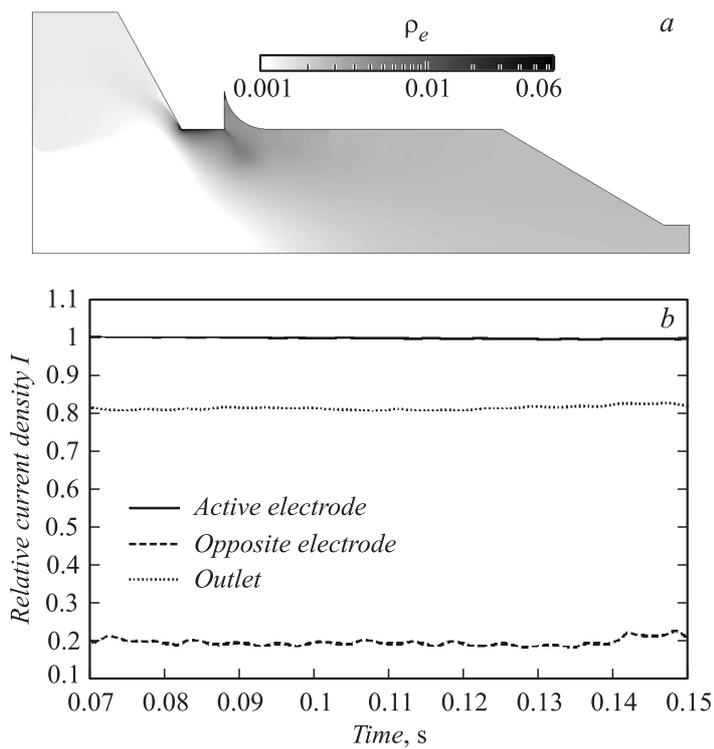
и изменялась в диапазоне 3.5–5.2.

Осевая компонента скорости  $V_z$  фиксирована и соответствует расходу 40.51/h ( $1.125 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ). Параметры турбулентности на входе равны следующим величинам:  $k_{in} = 0.22 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\omega_{in} = 20\,000 \text{ s}^{-1}$  (исходя из полученных авторами результатов предварительного трехмерного моделирования).

Использовалась расчетная сетка размером порядка 100 тыс. ячеек (в основном шестигранники). Вблизи стенок и в области между электродами сетка имеет сильное сгущение для детального разрешения структуры течения. Также имеется сильное сгущение сетки вблизи острия игольчатого электрода для получения более точного разрешения электрического поля в этой области. Расчет проводился в нестационарной постановке, поскольку в потоке присутствуют слабые нестационарные колебания.

На рис. 3, а представлено распределение объемной плотности заряда в потоке при значении параметра закрутки  $J = 4.1$ . За счет сильного турбулентного перемешивания заряд распространяется по всему каналу, достигая выходной границы форсунки. Максимальная концентрация заряда (порядка  $0.06 \text{ C}/\text{m}^3$ ) сосредоточена вблизи острия игольчатого электрода и вдоль диэлектрика между электродами.

Для определения количества выносимого из канала и нейтрализованного на противоположном электроде заряда вводится относительная величина  $I$ : отношение интеграла по площади от плотности потока



**Рис. 3.** *a* — Распределение плотности объемного заряда (в логарифмическом масштабе); *b* — относительный интегральный поток ионов  $I$ , образующихся у острия игольчатого электрода (active electrode), нейтрализуемых на противоположном электроде (opposite electrode) и выходящих с потоком топлива из форсунки (outlet).

заряда к среднему по времени интегралу по площади от плотности потока инжектируемого заряда при  $J = 4.1$

$$I = \frac{\int \mathbf{j} \mathbf{n} dS}{\int \mathbf{j}_{inj} \mathbf{n} dS}.$$

Величина осредненной по времени величины  $\int \mathbf{j}_{inj} \mathbf{n} dS$  при  $J = 4.1$  составляет  $4.186 \cdot 10^{-10}$  C/s. Для примера на рис. 3, *b* представлены за-

Относительный интегральный поток ионов, инжектируемых с электрода  $I_{inj}$  и выходящих из форсунки  $I_{outlet}$ , при разной степени закрутки потока  $J$

$J$	$I_{inj}$	$I_{outlet}$
3.5	0.98	0.87
4.1	1.0	0.82
5.2	1.0	0.81

висимости величины  $I$  от времени, рассчитываемые на выходе из канала и электродах для  $J = 4.1$ . Отметим, в данном случае количество электрического заряда в потоке на выходе форсунки превышает количество нейтрализованного заряда на электроде типа „плоскость с отверстием“ почти в 4 раза (чуть более 80% заряда выносится из канала), что дает основание рассматривать предложенную электрогидродинамическую систему как достаточно эффективную и обеспечивающую относительно большую долю заряда в потоке топлива на выходе форсунки.

В таблице представлена зависимость осредненной по времени величины  $I$  для разных степеней закрутки потока. Анализируя значения  $I_{outlet}$  на выходе из форсунки для разных вариантов граничных условий, можно отметить следующее. Изменение граничных условий в указанных пределах не сильно меняет картину течения в целом и процент выносимого заряда в частности, за исключением варианта с  $J = 3.5$ , в котором произошло заметное уменьшение количества выносимого с потоком топлива из форсунки заряда.

Таким образом, рассмотрена схема форсунки с электродной системой, расположенной так, чтобы минимизировать вносимое ею гидравлическое сопротивление. Проведен численный расчет нестационарного турбулентного течения в осесимметричном приближении с учетом переноса заряда и электрогидродинамических эффектов. За счет интенсивного турбулентного переноса количество выносимого из форсунки заряда достигает около 80% образуемого у игольчатого электрода заряда. В целом можно говорить об относительно слабом влиянии закрутки потока на процесс переноса заряда в рассмотренном диапазоне значений параметра закрутки, хотя его уменьшение приводит к небольшому увеличению количества выносимого заряда.

Нагорный В.С., Смирновский А.А. и Колодяжный Д.Ю. выражают благодарность Минобрнауки за финансовую поддержку данных прикладных научных исследований (ПНИ). Уникальный идентификатор ПНИ REMEF157714X0087.

## Список литературы

- [1] *Сипатов А.М., Карабасов С.А., Гомзигов Л.Ю., Абрамчук Т.В., Семанков Г.Н.* // Изв. вузов. Авиационная техника. 2014. № 1. С. 57–62.
- [2] *Khoshnevis A., Tsai S.S.H., Esmailzadeh E.* // Phys. Fluids. 2014. V. 26. P. 012 103.
- [3] *Van Poppel B., Desjardins O., Daily J.W.* // ILASS-Americas 22nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Cincinnati, OH. May 2010.
- [4] *Нагорный В.С.* Средства автоматики гидро- и пневмосистем.: СПб.; М.; Краснодар: Изд-во ЛАНЬ, 2014. 448 с.
- [5] *Стишков Ю.К., Чирков В.А.* Формирование электрогидродинамических течений // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 1. С. 3–13.
- [6] *Нагорный В.С.* // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 2. С. 25–31.
- [7] *Нагорный В.С.* // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 3. С. 34–42.
- [8] *Стишков Ю.К., Чирков В.А.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 12. С. 119–127.
- [9] *Adamiak K.* // J. Electrostatics. 2013. V. 71. P. 673–680.
- [10] *Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.* // Turbulence, heat and mass transfer. 2003. V. 4. P. 625–632.