

УДК 621.319.7.001.5

Владимир Константинович Семенов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-15, e-mail: semenov_vk@mail.ru

Андрей Александрович Беляков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-15, e-mail: bel.aes@ya.ru

Наталья Борисовна Иванова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат физико-математических наук, доцент кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-15, e-mail: rgr_ivanova@rambler.ru

Математическое моделирование затопленной струи электрического ветра

Авторское резюме

Состояние вопроса. Технологические процессы электрогазодинамики дисперсных систем основаны на зарядке и транспортировке частиц диспергированного сырья в сильном электрическом поле коронного разряда, который сопровождается турбулентным движением газа, обусловленным передачей импульса от ионов молекулам газа. Это сопутствующее движение, называемое «электрическим ветром», необходимо учитывать при расчете траекторий частиц и конструкций аппаратов. В последние годы разрабатывается аппаратура, действие которой предполагает непосредственное использование электрического ветра. Работы в этом направлении основываются в большинстве случаев на экспериментальных исследованиях и эмпирических формулах расчета, поэтому для постановки проектирования и конструирования аппаратуры данного направления на твердую научную основу требуется разработка математических моделей и методов расчета указанного явления.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования рассматривается униполярный электрический коронный разряд постоянного тока между отрицательным коронирующим проводом и плоским электродом в виде сетки. Расчет турбулентной струи электрического ветра рассмотрен как в рамках теории пограничного слоя, так и в полноценной постановке с использованием k - ε и k - ω моделей турбулентности в программе Comsol.

Результаты. Получены и сопоставляются два решения для поля скоростей затопленной плоской струи электрического ветра – аналитическое решение на основе теории пограничного слоя и численное решение в полномасштабной постановке на основе интегрирования уравнения Рейнольдса. Новизна решений состоит в том, что они выполнены для двумерной задачи и учитывают турбулентное движение газа.

Выводы. Явление электрического ветра широко используется в современных технологиях, позволяющих выполнить электрогазоочистку, дезинфекцию и очистку воды от органических загрязнений, а также, что особенно актуально в последнее время, обработку и обеззараживание поверхностей и воздуха. В случае распространения струи электрического ветра в закрытом канале выполняются условия приближения пограничного слоя и можно пользоваться автомодельным решением. В случае открытой струи электрического ветра расчет следует вести в полноценной постановке задачи на основе численного решения уравнения Рейнольдса.

Ключевые слова: электрический ветер, математическое моделирование, численное моделирование, униполярная корона, электроды провод – сетка, k - ε и k - ω модели турбулентности

Vladimir Konstantinovich Semenov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-15, e-mail: semenov_vk@mail.ru

Andrey Alexandrovich Belyakov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-15, e-mail: bel.aes@ya.ru

Natalia Borisovna Ivanova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-15, e-mail: rgr_ivanova@rambler.ru

Mathematical modeling of a submerged jet of electric wind

Abstract

Background. Technological processes of electro-gas dynamics of dispersed systems are based on charging and transporting dispersed raw material particles in a strong electric field of a corona discharge. It is accompanied by turbulent gas motion caused by momentum transfer of ions to gas molecules. This accompanying motion is called electric wind. It must be considered when calculating the trajectories of particles and devices design. In recent years, equipment is being developed, the operation of which is based on the direct use of electric wind. In most cases these studies are based on experimental research and empirical calculation formulas, therefore, to make the design and construction of this equipment science oriented, it is necessary to develop mathematical models and methods for calculating this phenomenon.

Materials and methods. The object of the research is a unipolar electric corona discharge of direct current between a negative corona wire and a flat electrode in the form of a mesh. The calculation of a turbulent jet of an electric wind is considered both within the framework of the boundary layer theory and in a full-scale formulation using the $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ turbulence models in the Comsol program.

Results. Two new solutions for the velocity field of a submerged flat jet of electric wind are found and compared. They are an analytical solution based on the boundary layer theory and a numerical solution in a full-scale formulation based on the Reynolds equation integration. The novelty of the solutions is that they are applied for a two-dimensional problem and consider the turbulent motion of gas.

Conclusions. The phenomenon of electric wind is widely applied in modern technologies that allow electric and gas cleaning, disinfection, and water purification from organic impurities, as well as treatment and disinfection of surfaces and air which is especially important recently. In the case of jet spread of electric wind in a closed channel, the boundary layer approximation conditions are satisfied, and a self-similar solution can be used. In the case of an open jet, the calculation should be carried out in a full-scale formulation of the problem based on the numerical solution of the Reynolds equation.

Key words: electric wind, mathematical modeling, numerical modeling, unipolar corona, wire-mesh electrodes, $k-\varepsilon$ and $k-\omega$ turbulence models

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.3.051-058

Введение. Явление под названием «электрический ветер», т.е. электрогидродинамическое течение в газах, порожденное электрическими разрядами, известно более трехсот лет [1]. Интерес к нему возродился в связи с развитием электрогазодинамики дисперсных систем при исследовании потоков диспергированного сырья под действием сильного электрического поля коронного разряда в электрофильтрах, электросепараторах и т. д. [2, 3]. Важно, что применение коронного разряда не требует больших затрат энергии, поскольку при коронном процессе не происходит нагрев объектов. Устройства, сконструированные на его основе, отличаются отсутствием движущихся деталей и, как следствие, низким уровнем шума и отсутствием вибраций.

В последние годы получили широкое распространение различные технологии, основанные на непосредственном применении электрического ветра и связанные с электрогазоочисткой, дезинфекцией, очисткой воды от органических загрязнений, обеззараживанием и увлажнением воздуха, разработкой бесшумных вентиляторов, охлаждением электронных устройств, устройств воспроизведения и подавления звука и пр. [4–8]. Исследованию электрического ветра посвящено много работ. В основном это либо экспериментальные исследования [1, 9, 10], либо экспериментально-теоретические, когда коронирующая область заменяется экспериментально подобранными граничными условиями. Часто задача рассматривается в различных приближениях: одномерном

[5], ламинарном [10] и др. Однако результаты экспериментальных исследований зависят от конфигурации экспериментальной установки, количества и взаимного расположения электродов и имеют ограниченный круг применения, поэтому проектирование устройств, использующих электрический ветер, требует разработки теоретических методов его расчета, основанных на гидрогазодинамике. Опыт показывает, что движение газа, называемое электрическим ветром, является турбулентным и, следовательно, чрезвычайно сложным [11, 12].

Методы исследования. Проведен сравнительный анализ двух математических моделей явления электрического ветра. В первом случае для упрощения задачи используется теория пограничного слоя. Во втором случае численно решается уравнение Рейнольдса для осредненного по турбулентным пульсациям уравнения Навье-Стокса. В обеих моделях расчет проведен для струйного течения воздуха, возникающего при униполярном отрицательном коронном разряде в системе электродов провод-сетка (рис. 1).

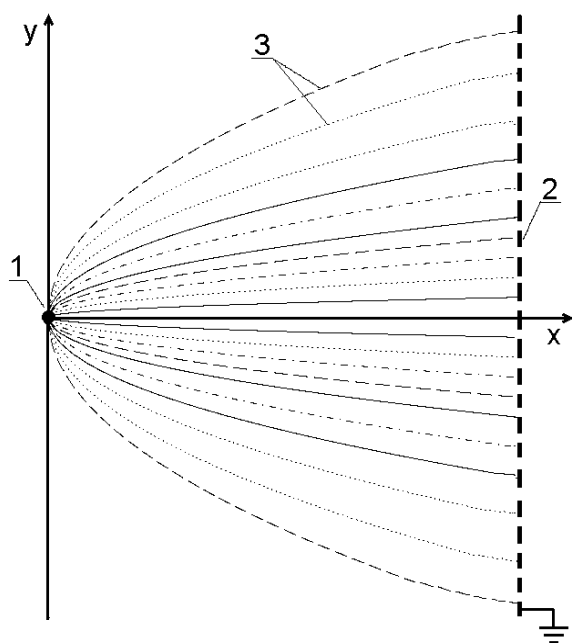


Рис. 1. Схема электродов униполярной короны постоянного тока: 1 – коронирующий отрицательный электрод; 2 – заземленный положительный электрод в виде сетки; 3 – линии плотности тока

Область коронного разряда состоит из двух частей – чехла короны, примыкающего непосредственно к проводу, и внеш-

ней области. В чехле короны под действием сильного электрического поля идет ударная ионизация с образованием электронов и положительных ионов, а внешняя зона заполнена отрицательными ионами одного знака, образующимися за счет прилипания электронов к нейтральным молекулам воздуха. Время прилипания электронов к нейтральным молекулам воздуха мало по сравнению с временем пролета электронами разрядного промежутка, поэтому считается, что внешняя часть разрядного промежутка заполнена только отрицательными ионами.

Вначале рассмотрим математическую модель явления в рамках теории пограничного слоя. Эта теория нашла большое применение при решении задач свободной турбулентности, и в частности при расчете свободных турбулентных струй [13–15].

В приближении теории пограничного слоя уравнения для плоской затопленной струи имеют следующий вид [13]:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{f_x}{\delta} + \frac{1}{\delta} \frac{\partial \tau_t}{\partial y}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

где u и v – продольная и поперечная компоненты скорости ветра соответственно, осредненные по турбулентным пульсациям; δ – плотность воздуха; f – внешняя сила, т.е. импульс, переданный молекулам воздуха в единицу времени в процессе их столкновений с ионами коронного разряда. При этом в первом приближении давление во всех случаях свободной турбулентности можно считать постоянным, поэтому градиент давления в уравнении движения (1) опущен.

Для внешней зоны коронного разряда можно записать

$$f = \rho E = \frac{j}{\mu}, \quad (3)$$

где ρ – плотность объемного заряда ионов; E – напряженность электрического поля; j – плотность тока короны; μ – подвижность ионов.

Плотность тока короны для рассматриваемой задачи может быть представлена в следующем виде [14]:

$$j = \frac{8}{3\pi} \frac{I_k}{x \left[1 + \left(\frac{y}{x} \right)^2 \right]^3}, \quad (4)$$

где I_k – ток короны с единицы длины провода.

Для турбулентного касательного напряжения использована хорошо показавшая себя в расчетах свободной турбулентности формула Прандтля [13]:

$$\tau_t = C\delta x u_0 \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (5)$$

где $C\delta x u_0$ – коэффициент турбулентной вязкости; u_0 – скорость ветра на оси струи.

Решение задачи расчета струи, т. е. системы уравнений (1)–(2), было выполнено аналитически методом интегральных соотношений [16]. Для этого уравнение (1) умножили на u^n , а уравнение (2) на u^{n+1} и сложили их между собой. В результате сложения получили

$$\frac{\partial}{\partial x}(u \cdot u^{n+1}) + \frac{\partial}{\partial y}(v \cdot u^{n+1}) = (n+1) \frac{ju^n}{\mu\delta} + \frac{(n+1)}{\delta} u^n \frac{\partial \tau_t}{\partial y}. \quad (6)$$

Так как струя свободная, то граничные условия для нее имеют следующий вид:

$$v = 0 \text{ и } \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \text{ при } y = 0;$$

$$u = 0 \text{ при } y \rightarrow \infty. \quad (7)$$

Интегрируя уравнение (6) поперек струи, с учетом граничных условий получим

$$\frac{d}{dx} \int_0^\infty u \cdot u^{n+1} dy = \frac{n+1}{\mu\delta} \int_0^\infty ju^n dy + \frac{n+1}{\delta} \int_0^\infty u^n \frac{\partial \tau_t}{\partial y} dy.$$

Из этого выражения при $n = 0$ и $n = 1$ получим интегральные соотношения Голубева для потока импульса и потока энергии:

$$\frac{d}{dx} \int_0^\infty u^2 dy = \frac{I_k}{2\mu\delta}; \quad (8)$$

$$\frac{d}{dx} \int_0^\infty u^3 dy = \frac{2}{\mu\delta} \int_0^\infty judy - 2 \int_0^\infty \varepsilon \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 dy. \quad (9)$$

Здесь учтено, что

$$u \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u^2}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2, \quad \varepsilon = Cbu_0 - \text{коэффициент турбулентной кинематической вязкости; } C - \text{эмпирическая постоянная; } b - \text{ширина зоны перемешивания в данном месте.}$$

Из (8) следует, что если для стабилизированного участка струи, так же как и для плотности тока, переменные разделяются, т.е. $u(x, y) = u_0(x) \varphi\left(\frac{y}{x}\right)$, то скорость на оси струи остается постоянной, т.е. $u_0 = const$, т.е. решение является автомодельным. Исходя из этого условия, решение для

продольной компоненты скорости будем искать в виде

$$u = \frac{u_0}{(1 + \alpha^2 \eta^2)^2}, \quad (10)$$

где $\eta = \frac{y}{x}$ – новая переменная; u_0 и α – параметры, подлежащие определению.

Подставляя выражение (10) в интегральные соотношения (8) и (9) и производя необходимые вычисления, получим алгебраические уравнения для определения U_0 и α :

$$\frac{u_0^2}{\alpha} = \frac{I_k}{\mu\delta}; \quad (11)$$

$$\frac{u_0^2}{\alpha} = \frac{0,86I_k(9-8\alpha)}{\mu\delta(3-2\alpha^2)} - 3,55Cu_0\alpha\sqrt{\frac{I_k}{\mu\delta}}. \quad (12)$$

$$\text{Из (11)–(12) получаем уравнение для } \alpha: \\ 3,54 \cdot C\alpha^{3,5} + \alpha^2 - 5,32 \cdot C\alpha^{1,5} - 3,4 \cdot \alpha + 2,33 = 0 \quad (13)$$

Входящую в уравнение (13) постоянную C следует найти из эксперимента по измерению профиля скорости. Из проведенных ранее экспериментов [11] следует, что в широком диапазоне токов короны опытное значение скорости на оси струи за сеткой определяется формулой

$$u_0^2 = \frac{0,85I_k}{\mu\delta}. \quad (14)$$

Из (12)–(14) находим $\alpha = 0,834$, $C = 0,087$.

Таким образом, приближенное аналитическое решение для продольной составляющей скорости электрического ветра имеет вид

$$u^2 = \frac{8}{3\pi} \frac{I_k}{\mu\delta \left[1 + 0,7\left(\frac{y}{x}\right)^2\right]^4}. \quad (15)$$

Используя уравнение непрерывности (2), находим решение для поперечной компоненты скорости:

$$v^2 = 0,31 \frac{I_k}{\mu\delta} \left[\frac{0,834 \cdot \eta(1-0,7\eta^2)}{(1+0,7\eta^2)^2} - \text{arctg}(0,834\eta) \right]^2.$$

Оценить точность интегрального метода решения задачи можно, рассмотрев его применение для ламинарной струи, которая возможна, видимо, только при очень малых токах короны. Для ламинарной струи можно найти точное решение для осевой скорости и сравнить его с решением, найденным интегральным методом.

Ламинарная струя подчиняется уравнению Прандтля

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{j}{\mu \delta} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (16)$$

В этом уравнении сила вязкого трения $v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ по порядку величины значительно меньше движущей силы, т.е. электрический ветер можно рассматривать по законам гидродинамики идеальной жидкости. С учетом сказанного уравнение для скорости на оси струи принимает вид

$$u_0 \frac{\partial u_0}{\partial x} = \frac{j_0}{\mu \delta}, \quad (17)$$

где j_0 – плотность тока короны на оси струи.

Умножая члены уравнения (17) на ширину трубки тока короны γ и интегрируя вдоль трубки тока по x до некоторого фиксированного значения X этой координаты, получим

$$\int_0^x \gamma \frac{du_0^2}{dx} dx = \frac{2j_0 \gamma X}{\mu \delta}. \quad (18)$$

Беря интеграл в левой части уравнения по частям, получим

$$\gamma u_0^2 = \frac{2j_0 \gamma X}{\mu \delta} + \int_0^x u_0^2 \frac{d\gamma}{dx} dx. \quad (19)$$

Ширину трубки тока найдем из условия, что силовые линии поля короны совпадают по условиям симметрии с силовыми линиями электростатического поля (рис. 2). Анализ распределения силовых линий показывает, что $\rho + \cos \varphi_0 \cdot dh = \rho_1 + dh \cdot \cos \varphi$, $\rho = AB$, $\rho_1 = OA$. Определяя отсюда ρ_1 , находим $\gamma = \rho - \rho_1 = dh(\cos \varphi - \cos \varphi_0)$.

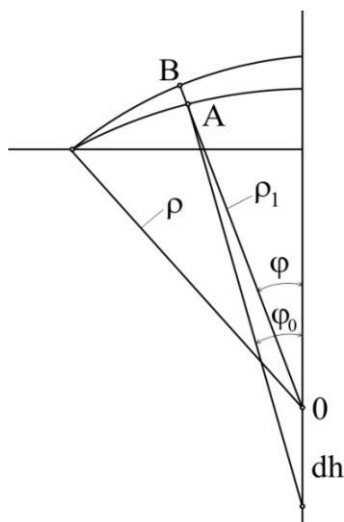


Рис. 2. Геометрия трубки тока вблизи оси струи ($\rho = OB$, $\rho_1 = OA$, $\gamma = AB = \rho - \rho_1$)

При $\varphi = \varphi_0 - \frac{x}{\rho}$ и учитывая то, что при

малом φ выполняется $\cos \varphi \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2}$, получим

$$\gamma = \frac{H^2 dh}{2\rho^2} [1 - (1 - x/H)^2],$$

тогда

$$\frac{d\gamma}{dx} = \frac{H dh}{\rho^2} (1 - x/H). \quad (20)$$

Итак, решение уравнения (19) будем искать в виде

$$u_0^2 = \frac{B j_0 x}{\mu \delta}, \quad (21)$$

где B – постоянная, подлежащая определению.

Подставляя (20) и (21) в (19), после несложных вычислений получим $B = 2,86$, т. е.

$$u_0^2 = \frac{2,86 j_0 x}{\mu \delta},$$

а при $x = H$ получим

$$u_0^2 = \frac{2,43 I_k}{\mu \delta}, \quad (22)$$

тогда как на основании метода интегральных соотношений осевая скорость равна

$$u_0^2 = \frac{2,52 I_k}{\mu \delta}. \quad (23)$$

Сравнение решений показывает, что максимальная погрешность метода интегральных соотношений не превосходит 30 %. Переход от ламинарного движения к турбулентному происходит скачком. Скорость ветра на оси струи падает от значения

$$u_0 = \sqrt{\frac{2,52 I_k}{\mu \delta}} \text{ до значения } u_0 = \sqrt{\frac{0,85 I_k}{\mu \delta}},$$

т.е. турбулентное перемешивание приводит к размазыванию профиля скорости.

Правомерность применения уравнений пограничного слоя для турбулентных течений без ограничивающих стенок основана на том факте, что протяженность течения в поперечном направлении всегда мала по сравнению с продольной протяженностью. Анализ формулы (4) показывает, что ширина профиля объемной силы и протяженность струи – величины одного порядка, т.е. условие применимости уравнений пограничного слоя нарушено, поэтому в данной работе рассмотрена еще и полноценная постановка задачи на основе

решения уравнения Рейнольдса с использованием моделей турбулентности высоко-го уровня.

В нашем примере численное решение уравнения Рейнольдса получено при токе короны $I_k = 6 \cdot 10^{-3}$ (А/м) и подвижности ионов $\mu = 2 \cdot 10^{-4}$ (м²/В·с) при помощи пакета программ Comsol с использованием двух моделей турбулентности $k-\varepsilon$ и $k-\omega$. Предварительный расчет был выполнен на основе модели $k-\varepsilon$, а затем был выполнен уточняющий расчет на основе модели $k-\omega$.

Результаты исследования. На рис. 3 представлен график зависимости скорости струи на оси струи от продольной координаты. Анализ графика показывает, что участок стабилизированного течения, на котором скорость остается примерно постоянной, имеет протяженность от 8 до 14 см. Полученный результат не согласуется с решением на основе уравнений пограничного слоя, согласно которому скорость на оси струи не зависит от расстояния до коронирующего электрода.

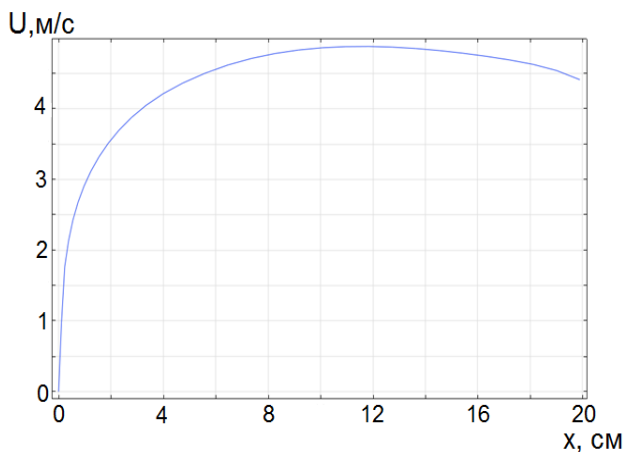


Рис. 3. Зависимость скорости электрического ветра на оси струи от продольной координаты

На рис. 4, 5 представлены профили продольной скорости на разных расстояниях от коронирующего электрода. Анализ зависимостей показывает, что в области стабилизированного течения профили близки друг к другу (рис. 4), а на далеких и близких расстояниях от оси провода они отличаются довольно значительно (рис. 5).

На рис. 6 показаны кривые расчетных профилей скорости для стабилизированного участка течения на основе теории пограничного слоя и на основе полноценной постановки задачи. Сравнительный анализ полученных кривых показывает

различное распределение скоростей электрического ветра.

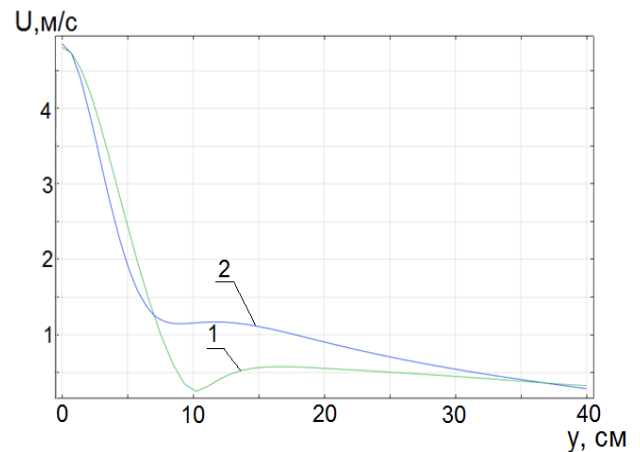


Рис. 4. Зависимость скорости электрического ветра от поперечной координаты: 1 – на расстоянии $x = 10$ см от коронирующего электрода; 2 – на расстоянии $x = 15$ см от коронирующего электрода

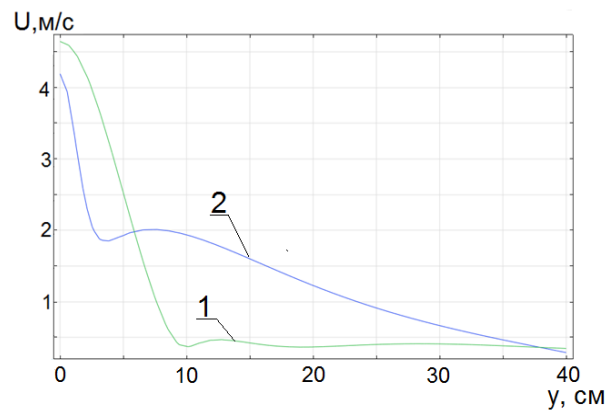


Рис. 5. Зависимость скорости электрического ветра от поперечной координаты: 1 – на расстоянии $x = 4$ см от коронирующего электрода; 2 – на расстоянии $x = 18$ см от коронирующего электрода

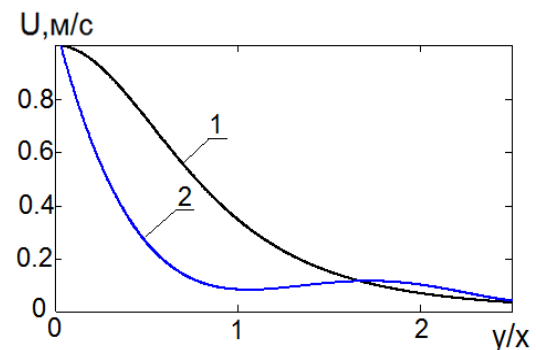


Рис. 6. Кривые профилей скорости: 1 – в приближении пограничного слоя; 2 – при полноценном решении

Вывод. Из сравнения полученных результатов решения уравнения Рейнольдса с результатами расчета в рамках теории пограничного слоя следует, что, вопреки ожиданию, решение для открытой струи электрического ветра не является автомоделным и при проектировании устройств следует вести расчет в полноценной постановке задачи на основе численного решения уравнения Рейнольдса. Для струи электрического ветра в узких каналах закрытых систем приближение пограничного слоя выполняется и можно им пользоваться.

Список литературы

1. **Остроумов Г.А.** Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. – М.: Наука, 1979. – 319 с.
2. **Рубашов И.Б., Бортников Ю.С.** Электрогазодинамика. – М.: Атомиздат, 1971.
3. **Основы** электрогазодинамики дисперсных систем / И.П. Верещагин, В.И. Левитов, Г.З. Мирзабекян, М.М. Пашин. – М.: Энергия, 1974.
4. **Леонов В.В.** Исследование явления электрического ветра и применение его для перекачивания жидких диэлектриков // Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2011. – Вып. 1. – С. 91–101.
5. **Ксенз Н.В., Белоусов А.В., Меликова О.В.** Электрический ветер в системе электродов игла–решетка // Вестник аграрной науки Дона. – 2010. – № 2. – С. 1–6.
6. **Вентилятор-озонатор** коронного разряда с прокачкой воздуха электрическим ветром / А.Е. Королев, В.В. Васильев, Н.М. Верещагин, К.В. Шемарин // Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии: материалы 32-го Всероссийского семинара. Москва, химический факультет МГУ, 2012. – М.: Макспресс, 2012. – С. 169–172.
7. **Андреев С.А., Загинайлов В.И., Воробьев В.А.** Использование явления ионного ветра в технологических процессах АПК // Вестник «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства». – 2017. – № 6. – С. 72–76.
8. **Криштафович И.А., Криштафович Ю.А.** Ионный ветер и его применения // www.lib.knigi-x.ru «Бесплатная электронная библиотека – электронные материалы». – 2017. – С. 267.
9. **Козлов Б.А., Соловьев Б.И.** Исследование электрического ветра в электродных системах с коронирующими остриями // ЖТФ. – 2007. – Т. 77, вып. 7. – С. 70–76.
10. **Самусенко А.В., Сафронова Ю.Ф., Стишков Ю.К.** Униполярная модель электрического ветра, вызванного положительным коронным разрядом // ЭОМ. – 2016. – № 5. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/unipolyarnaya-](https://cyberleninka.ru/article/n/unipolyarnaya-model-elektricheskogo-vetra-vyzvannogo-polozhitelnyim-koronnym-razryadom)

model-elektricheskogo-vetra-vyzvannogo-polozhitelnyim-koronnym-razryadom (дата обращения: 28.04.2021).

11. **Волков В.Н., Палкин Л.Н., Семенов В.К.** К гидродинамике электрического ветра // Сильные электрические поля в технологических процессах (электронно-ионная технология). Вып. 2. – М.: Энергия, 1971.
12. **Волков В.Н., Семенов В.К.** Электрогидростатический метод измерения подвижности ионов в поле униполярной короны // Изв. вузов СССР. Физика. – 1971. – № 4.
13. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974.
14. **Попков В.И.** К теории коронного разряда при постоянном напряжении // Изв. АН СССР, ОТН. – 1953. – № 5.
15. **Гиневский А.С.** Теория турбулентных струй и следов. – М.: Машиностроение, 1969.
16. **Абрамович Г.Н.** Теория турбулентных струй. – М.: Наука, 1989.

References

1. Ostroumov, G.A. *Vzaimodeystvie elektricheskikh i gidrodinamicheskikh poley* [Interaction of electric and hydrodynamic fields]. Moscow: Nauka, 1979. 319 p.
2. Rubashov, I.B., Bortnikov, Yu.S. *Elektrogazodinamika* [Electro-gas dynamics]. Moscow: Atomizdat, 1971.
3. Vereshchagin, I.P., Levitov, V.I., Mirzabekyan, G.Z., Pashin, M.M. *Osnovy elektrogazodinamiki dispersnykh sistem* [Fundamentals of electro-gas dynamics of dispersed systems]. Moscow: Energiya, 1974.
4. Leonov, V.V. *Issledovanie yavleniya elektricheskogo vetra i primeneniye ego dlya perekachivaniya zhidkikh dielektrikov* [Study of the phenomenon of electric wind and its application for pumping liquid dielectric]. *Elektromekhanicheskie i energosberegayushchie sistemy*, 2011, issue 1, pp. 91–101.
5. Ksenz, N.V., Belousov, A.V., Melikova, O.V. *Elektricheskiy veter v sisteme elektrodov iglareshetka* [Electric wind in the needle-lattice electrode system]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, 2010, no. 2, pp. 1–6.
6. Korolev, A.E., Vasil'ev, V.V., Vereshchagin, N.M., Shemarin, K.V. *Ventilyator-ozonator koronnogo razryada s prokachkoy vozdukhа elektricheskim vetrom* [Corona discharge fan-ozonator with electric wind pumping air]. *Materialy 32-go Vserossiyskogo seminara «Ozon i drugie ekologicheski chistye okisliteli. Nauka i tekhnologii»*, Moskva, khimicheskiy fakul'tet MGU, 2012 [Materials of the 32nd All-Russian Seminar "Ozone and other environmentally friendly oxidizers. Science and technology", Moscow, Faculty of Chemistry, Moscow State University 2012]. Moscow: Makspress, 2012, pp. 169–172

7. Andreev, S.A., Zaginaylov, V.I., Vorob'ev, V.A. Ispol'zovanie yavleniya ionnogo vetra v tekhnologicheskikh protsessakh APK [The use of the phenomenon of ionic wind in the technological processes of the agro-industrial complex]. *Vestnik «Elektrifikatsiya i avtomatizatsiya sel'skogo khozyaystva»*, 2017, no. 6, pp. 72–76.

8. Krishtafovich, I.A., Krishtafovich, Yu.A. Ionnyy veter i ego primeneniya [Ionic wind and its applications]. *www.lib.knigi-x.ru – «Besplatnaya elektronnyaya biblioteka – elektronnye materialy»*, 2017, p. 267.

9. Kozlov, B.A., Solov'ev, B.I. Issledovanie elektricheskogo vetra v elektrodnykh sistemakh s koroniruyushchimi ostriyami [Study of the electric wind in electrode systems with corona-forming tips]. *ZhTF*, 2007, vol. 77, issue 7, pp. 70–76.

10. Samusenko, A.V., Safronova, Yu.F., Stishkov, Yu.K. Unipolyarnaya model' elektricheskogo vetra, vyzvannogo polozhitel'nym koronnym razryadom [Unipolar model of the electric wind caused by a positive corona discharge]. *EOM*, 2016, no. 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/unipolyarnaya-model-elektricheskogo-vetra-vyzvannogo-polozhitelnym-koronnym-razryadom> (date of access: 28.04.2021).

11. Volkov, V.N., Palkin, L.N., Semenov, V.K. K gidrodinamike elektricheskogo vetra [On the hydrodynamics of electric wind]. *Sil'nye elektricheskie polya v tekhnologicheskikh protsessakh (elektronno-ionnaya tekhnologiya)* [Strong electric fields in technological processes (electronic-ion technology)]. Moscow: Energiya, 1971, issue 2.

12. Volkov, V.N., Semenov, V.K. Elektrogidrostatiicheskiy metod izmereniya podvizhnosti ionov v pole unipolyarnoy korony [Electrohydrostatic method for measuring the mobility of ions in the field of a unipolar corona]. *Izvestiya vuzov SSSR. Fizika*, 1971, no. 4.

13. Shlikhting, G. *Teoriya pogrannichnogo sloya* [Theory of the boundary layer]. Moscow: Nauka, 1974.

14. Popkov, V.I. K teorii koronnogo razryada pri postoyannom napryazhenii [On the theory of corona discharge at constant voltage]. *Izvestiya ANSSSR, OTN*, 1953, no. 5.

15. Ginevskiy, A.S. *Teoriya turbulentnykh struy i sledov* [The theory of turbulent jets and wakes]. Moscow: Mashinostroenie, 1969.

16. Abramovich, G.N. *Teoriya turbulentnykh struy* [The theory of turbulent jets]. Moscow: Nauka, 1989.