

## Особенности влияния влажного воздуха на аэродинамические характеристики механизированного крыла на режиме взлета

© М.А. Брутян,<sup>1,2</sup> О.В. Павленко,<sup>1,2</sup> Йе Хтун<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, 140180 Жуковский, Московская обл., Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, 141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия  
e-mail: olga.v.pavlenko@yandex.ru

Поступило в Редакцию 2 мая 2024 г.

В окончательной редакции 2 июля 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Представлены результаты численного исследования влияние влажности воздуха на аэродинамические характеристики профиля крыла с закрылком во взлетной конфигурации. Численные исследования проведены в двухкомпонентной среде, состоящей из сухого воздуха и водяного пара. Исследовано влияние объемного содержания водяного пара в воздухе на максимальную подъемную силу, сопротивление и критический угол атаки. Показано, что заметное влияние наблюдается только в режимах отрывного обтекания. Расчеты выполнены по программе, основанной на решении осредненных по Рэйнольдсу уравнений Навье–Стокса.

**Ключевые слова:** аэродинамические характеристики, профиль крыла с закрылком, двухфазный поток, CFD-методы.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59270.335-24

Молекулярные и термодинамические свойства среды оказывают непосредственное влияние на обтекание летательного аппарата. Известно, что влажность, влияние которой на плотность воздуха незначительно при низких температурах и заметно при высоких температурах, приводит к уменьшению плотности воздуха по сравнению с плотностью сухого воздуха. Принято, что значения параметров атмосферы по высоте вычисляются по формулам, полученным для стандартной атмосферы [1] в предположении, что воздух является абсолютно сухим. В действительности воздух всегда содержит некоторое количество паров воды, и его параметры отличаются от стандартных значений. Влияние тумана на аэродинамические характеристики летательных аппаратов до сих пор мало изучено. Проблемы, связанные с воздействием тумана на авиационную технику при взлете или посадке, обычно связывают с ограничением видимости ниже допустимых пределов, не учитывая при этом влияние изменения свойств окружающей среды [2–4]. Особенность воздействия состоит в том, что заметное влияние наблюдается только на режимах отрывного обтекания, что является новым результатом. Настоящая работа проведена с целью выявления фактов и механизмов воздействия тумана на аэродинамические характеристики профиля крыла.

В настоящей работе проведено численное исследование влияния влажности воздуха на аэродинамические характеристики профиля крыла с отклоненным закрылком на режиме взлета. Рассматривается разрезной профиль CLARC Y+ относительной толщины  $\bar{c} = 12\%$ , с хордой  $b = 0.64$  м и отклоненным закрылком на угол  $\delta_{flap} = 20^\circ$  [5]. Закрылок имеет хорду, равную  $1/3$  хорды

профиля крыла. Носовая часть профиля закрылка выполнена в виде дуги окружности, вписанной в верхнюю поверхность профиля. Ширина щели между основным профилем и закрылком равна  $1.5\%$  хорды профиля (рис. 1).

Численные исследования проведены в стационарной постановке по программе, основанной на решении осредненных по Рэйнольдсу уравнений Навье–Стокса, на структурированной расчетной сетке, содержащей около 1 миллиона ячеек, из которых 150 расположены по хорде крыла. Для разрешения пограничного слоя была создана специальная сетка типа *o-grid*, построенная по нормали к поверхности и содержащая по высоте 20 ячеек. При моделировании области пограничного слоя высота первой ячейки вблизи поверхности крыла выбиралась такой, чтобы пограничный слой вместил достаточное количество ячеек для расчета пристеночной функции. Значение параметра  $y^+$  в первом пристеночном узле было  $y^+ \leq 0.365$ . В расчете использована *k- $\epsilon$ -realizable* модель турбулентности [6] с учетом влияния градиента давления и улучшенным моделированием параметров турбулентности вблизи стенки. В пристеночной области использовалась однопараметрическая модель турбулентности, адаптированная к течениям в

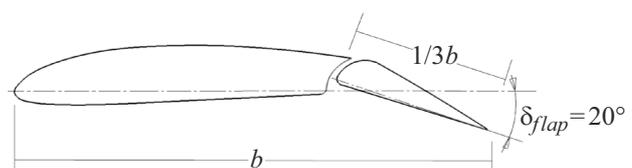


Рис. 1. Расчетная модель профиля крыла с закрылком.

Условия проведения расчетов

Процент объема пара в воздухе $\eta, \%$	Плотность смеси $\rho, \text{kg/m}^3$	Динамическая вязкость смеси $\mu \cdot 10^5, \text{Pa}\cdot\text{s}$	Число Рейнольдса $\text{Re} \cdot 10^{-6}$
0	1.2250	1.79	3.46
8	1.1713	1.75	3.42
16	1.1177	1.72	3.33
25	1.0573	1.68	3.23

пограничном слое [7]. Для расчета стационарного обтекания профиля с закрылком потоком влажного воздуха использовалась упрощенная модель среды „Mixture“. В этой модели используется уравнение неразрывности  $\nabla(\rho_m \mathbf{V}_m) = 0$ , где  $\mathbf{V}_m = \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{V}_k \right) / \rho_m$  — средняя массовая скорость потока, а  $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$  — плотность смеси,  $n$  — количество компонентов смеси; в рассматриваемом случае  $n = 2$ .

Уравнение импульсов для данной модели среды получено путем суммирования соответствующих уравнений для каждой компоненты:

$$\nabla(\rho_m \mathbf{V}_m \mathbf{V}_m) = -\nabla p + \nabla[(\nabla \mathbf{V}_m + \nabla \mathbf{V}_m^T)] - \nabla \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{V}_{dr,k} \mathbf{V}_{dr,k} \right),$$

где  $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$  — вязкость смеси, а  $\mathbf{V}_{dr,k} = \mathbf{V}_k - \mathbf{V}_m$  — относительная скорость компонентов смеси.

Уравнение энергии для данной модели смеси газов имеет следующий вид:

$$\nabla \sum_{k=1}^n (\alpha_k \mathbf{V}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla(k_{eff} \nabla T),$$

где  $k_{eff}$  — коэффициент эффективной теплопроводности,  $k_{eff} = \sum_{k=1}^n \alpha_k (k_k + k_t)$ ;  $k_k$  — коэффициент молекулярной теплопроводности  $k$ -й компоненты смеси;  $k_t$  — коэффициент турбулентной теплопроводности, определяемый в соответствии с используемой моделью турбулентности;  $E_k = h_k - p/\rho_k + V_k^2/2$  — для сжимаемой компоненты, а  $E_k = h_k$  — для несжимаемой компоненты, где  $h_k$  — энтальпия  $k$ -й компоненты смеси.

Расчеты выполнены при критическом угле атаки  $\alpha_{cr} = 12^\circ$  при скорости набегающего потока  $V = 80 \text{ m/s}$ , атмосферном давлении  $p = 101325 \text{ Pa}$ , температуре окружающей среды  $t = 15^\circ\text{C}$  как в сухом, так во влажном воздухе, состоящим из воздуха и водяного пара в различных пропорциях см. таблицу). Известно, что радиус капель в тумане от 1 до  $60 \mu\text{m}$ , при этом

большинство капель имеет радиус  $5-15 \mu\text{m}$  при положительной температуре воздуха и  $2-5 \mu\text{m}$  при отрицательной температуре. Поэтому в настоящем расчете при положительной температуре воздуха был принят размер частичек пара  $10 \mu\text{m}$ . Частицы, имитирующие водяной пар (water-vapor), были равномерно распределены по расчетному объему.

Численные исследования показали, что с увеличением влажности максимальная подъемная сила возрастает (рис. 2). При этом увеличивается и критический угол атаки. Так, при обтекании профиля крыла в сухом воздухе  $\alpha_{cr} = 8^\circ$ , а во влажном воздухе при  $\eta = 25\%$  он увеличивается до  $\alpha_{cr} = 12^\circ$ . Это явление объясняется тем, что с увеличением влажности воздуха положение точки отрыва пограничного слоя на закрылке смещается к его задней кромке.

Профили скорости в пограничном слое на отклоненном закрылке при различных значениях концентрации водяного пара  $\eta\%$  показаны на рис. 3. На этом рисунке значение скорости отнесено к скорости на внешней границе пограничного слоя,  $\bar{u} = u/u_e$ , а расстояние по нормали к поверхности закрылка отнесено к толщине пограничного слоя,  $\bar{n} = n/\delta$ . Согласно расчетам, в сухом воздухе точка отрыва расположена на расстоянии  $\bar{x} = x/b = 0.92$  от носка закрылка. В этой точке зависимость  $\bar{u} = \bar{u}(\bar{n})$  при  $\eta = 0\%$  имеет характер профиля скорости с нулевым трением,  $\tau_\omega \sim (\partial \bar{u} / \partial \bar{n})_\omega \approx 0$  (рис. 3); в диапазоне  $\bar{x} = x/b = 0.92$  наблюдается возвратное течение,  $\tau_\omega < 0$ . При увеличении влажности касательное напряжение  $\tau_\omega$  на поверхности закрылка возрастает. При  $\eta = 25\%$  точка отрыва смещается на заднюю кромку закрылка, а в точке  $\bar{x} = 0.92$  касательное напряжение становится положительным,  $\tau_\omega > 0$ .

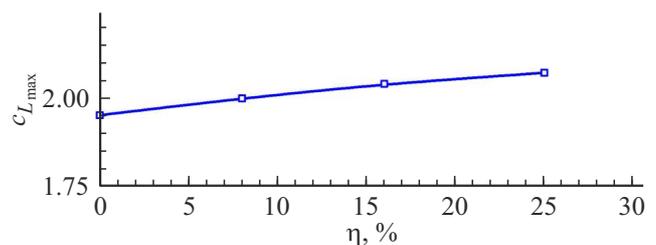
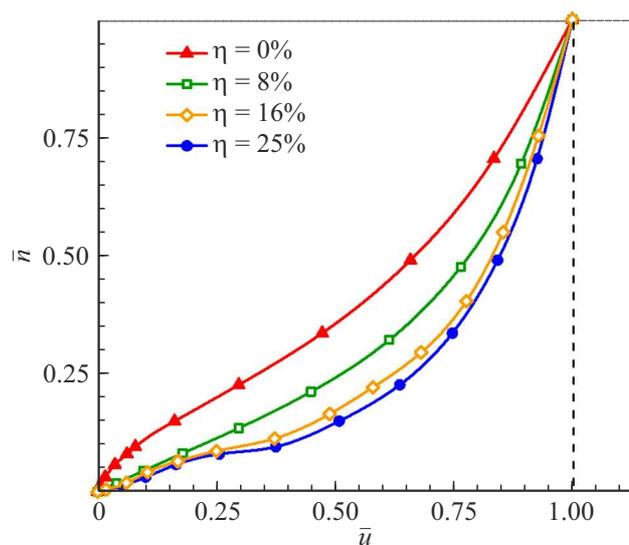


Рис. 2. Зависимость коэффициента максимальной подъемной силы профиля с закрылком от процентного содержания водяного пара в воздухе.



**Рис. 3.** Распределение скоростей в пограничном слое в точке на верхней поверхности закрылка  $x = 0.92b$

Показано, что в особых метеоусловиях, например в тумане, влажность воздуха следует учитывать на взлетно-посадочных режимах полета, так как она влияет на аэродинамические силы. Даже в небольшом диапазоне чисел  $Re = 3.23 \cdot 10^6 - 3.46 \cdot 10^6$  при уменьшении влажности воздуха коэффициент максимальной подъемной силы может уменьшиться на 6%, а критический угол атаки на  $\Delta\alpha_{cr} = 4^\circ$ . Для летательных аппаратов данное явление может представлять опасность при наличии тумана на взлетно-посадочной полосе.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] В.В. Миняев. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки, 2, 106 (2004).
- [2] А.Л. Рыбалкина, А.С. Спирин, Е.Н. Трусова. Научный Вестник МГТУ ГА, 21 (03), 101 (2018).
- [3] Д.В. Дьячков, О.В. Золотарев. Международная конф. „Физико-техническая информатика — СРТ 2020“. АНО „Научно-исследовательский центр Физико-технической информатики“ 2020. С. 289–320.
- [4] В.А. Позднякова. *Практическая авиационная метеорология*, учебн. пособие для летного и диспетчерского состава ГА (Екатеринбург, 2010), с. 113.
- [5] М.А. Брутян, Йе Хтун, О.В. Павленко. Труды МФТИ, Механика, 16 (1), 112 (2024).
- [6] T.H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, J.A. Zhu. Computers Fluids, 24 (3), 227 (1995).
- [7] M. Wolfshtein. Intern. J. Heat and Mass Transfer, 12 (3), 301 (1969).