

УДК 629.7

ФОРМИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОФИЛЯХ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Бавбель Е.И.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Рассматриваются закономерности течения воздуха при малых числах Рейнольдса. Описаны особенности формирования пограничного слоя и условия возникновения отрыва потока на аэродинамических профилях. Показано влияние числа Рейнольдса на аэродинамические характеристики летательных аппаратов малого размера.

Ключевые слова: число Рейнольдса, аэродинамика, пограничный слой, ламинарное течение, аэродинамический профиль.

Исследование вязких течений около аэродинамических поверхностей представляет фундаментальную проблему современной аэродинамики, решение которой определяет эффективность проектирования летательных аппаратов различных классов [1-19]. Характер течения воздуха вокруг летательного аппарата определяется рядом параметров, среди которых особое значение имеет число Рейнольдса. Данный параметр характеризует соотношение инерционных и вязкостных сил в потоке воздуха и позволяет определить режим течения [5].

Для летательных аппаратов малого размера (мини- и микро-БПЛА, авиамодели) типичны значения числа Рейнольдса порядка 10^4 – 10^5 , что на два–три порядка ниже, чем для транспортных самолётов [3]. В указанном диапазоне вязкостные эффекты приобретают первостепенное значение, обуславливая специфику структуры пограничного слоя и механизмов взаимодействия потока с обтекаемой поверхностью [4].

Формирование пограничного слоя на профиле крыла при малых числах Рейнольдса характеризуется преобладанием ламинарного режима течения, толщина которого определяется соотношением $\delta \approx 5x/\sqrt{Re_x}$, где x – текущая координата вдоль профиля, Re_x – локальное число Рейнольдса [5]. Ламинарный пограничный слой обладает повышенной чувствительностью к нарушению благоприятного градиента давления, что предопределяет возможность преждевременного отрыва потока и формирования зоны рециркуляции с соответствующим изменением аэродинамических сил и моментов [6].

Отрыв ламинарного пограничного слоя приводит к качественной перестройке структуры обтекания, сопровождающейся ростом сопротивления давления и снижением несущей способности профиля [7]. Данные эффекты детерминируют необходимость разработки специализированных методов профилирования и управления пограничным слоем для обеспечения требуемых аэродинамических характеристик летательных аппаратов малого размера [8].

Актуальность исследования обусловлена расширением областей применения беспилотных авиационных систем с ограниченными линейными размерами, требующих достоверного прогнозирования аэродинамических характеристик в условиях доминирования вязкостных эффектов [9]. Существующие методики расчёта, верифицированные для высоких чисел Рейнольдса, требуют адаптации и валидации для диапазона $Re < 10^5$ с учётом специфики ламинарно-турбулентного перехода и отрывных явлений [10].

Целью настоящей работы является анализ закономерностей формирования пограничного слоя на аэродинамических профилях при малых числах Рейнольдса и оценка влияния вязкостных эффектов на интегральные аэродинамические характеристики летательных аппаратов малого размера.

Для летательных аппаратов малого размера характерны относительно небольшие линейные размеры и сравнительно низкие скорости полета. В результате этого значения числа Рейнольдса оказываются значительно ниже, чем для крупных летательных аппаратов. В таких условиях вязкостные силы начинают оказывать более заметное влияние на структуру потока и на характер взаимодействия воздушного потока с поверхностью крыла.

Число Рейнольдса определяется следующим выражением:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (1)$$

где: ρ – плотность воздуха;

V – скорость потока;

L – характерный линейный размер;

μ – динамическая вязкость воздуха.

Для летательных аппаратов малого размера значения числа Рейнольдса обычно находятся в диапазоне 10^4 – 10^5 . В данном диапазоне течение воздуха имеет ряд особенностей, связанных с повышенным влиянием вязкости. Это приводит к изменению структуры пограничного слоя и может оказывать заметное влияние на аэродинамические характеристики профилей крыла [16].

При движении воздушного потока вдоль поверхности аэродинамического профиля формируется пограничный слой. Пограничный слой представляет собой тонкую область потока, в которой скорость воздуха изменяется от нуля на поверхности крыла до скорости основного потока. Формирование пограничного слоя связано с действием вязкости воздуха и взаимодействием потока с поверхностью аэродинамического профиля.

Толщина пограничного слоя зависит от расстояния от передней кромки крыла и параметров потока. Для ламинарного режима течения она может быть приближенно определена по выражению:

$$\delta \approx \frac{5x}{\sqrt{Re_x}} \quad (2)$$

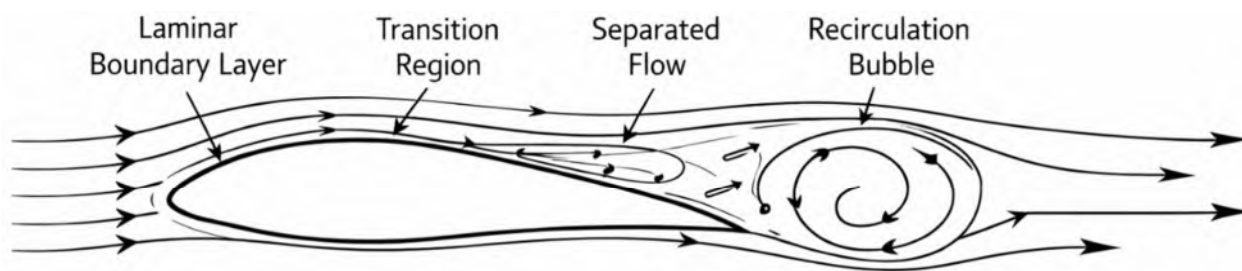
где: x – расстояние от передней кромки профиля;

Re_x – локальное число Рейнольдса.

При малых числах Рейнольдса пограничный слой может сохранять ламинарный характер на значительной части поверхности крыла. Однако ламинарное течение обладает меньшей устойчивостью по сравнению с турбулентным. Под действием внешних возмущений ламинарный пограничный слой может переходить в турбулентный режим течения.

Кроме того, при неблагоприятном градиенте давления возможно возникновение отрыва потока от поверхности аэродинамического профиля. Отрыв потока сопровождается образованием вихревых структур и приводит к изменению распределения давления на поверхности крыла. Это может вызывать увеличение аэродинамического сопротивления и снижение подъемной силы профиля [17].

На рисунке 1 представлена схема формирования пограничного слоя при малых числах Рейнольдса.



Airfoil at Low Reynolds Number

Рисунок 1 – Формирование пограничного слоя и возможный отрыв потока при малых числах Рейнольдса

Отрыв потока является одним из факторов, оказывающих существенное влияние на аэродинамические характеристики летательных аппаратов малого размера. В связи с этим при проектировании аэродинамических профилей необходимо учитывать влияние числа Рейнольдса на структуру потока и характеристики пограничного слоя.

Анализ закономерностей течения воздуха при малых числах Рейнольдса позволяет более точно оценивать аэродинамические характеристики летательных аппаратов малого размера. Учет данных особенностей является важным этапом при проектировании аэродинамических профилей и оптимизации параметров летательных аппаратов [1–19].

В работе рассмотрены закономерности течения воздуха при малых числах Рейнольдса и их влияние на аэродинамические характеристики летательных аппаратов малого размера. Показано, что при уменьшении числа Рейнольдса возрастает влияние вязкостных сил, что приводит к изменению структуры пограничного слоя и характера взаимодействия воздушного потока с поверхностью аэродинамического профиля.

Отмечено, что при малых числах Рейнольдса пограничный слой может сохранять ламинарный характер на значительной части поверхности крыла, однако такой режим течения обладает меньшей устойчивостью. При неблагоприятных условиях возможен переход ламинарного течения в турбулентное, а также возникновение отрыва потока, что приводит к увеличению аэродинамического сопротивления и снижению подъемной силы.

Полученные результаты показывают, что учет закономерностей течения воздуха при малых числах Рейнольдса является важным этапом при проектировании летательных аппаратов малого размера. Анализ структуры пограничного слоя и условий возникновения отрыва потока позволяет более точно оценивать аэродинамические характеристики профилей и повышать эффективность летательных аппаратов.

Дополнительное исследование особенностей течения воздуха при малых числах Рейнольдса представляет интерес для дальнейшего совершенствования аэродинамических профилей и разработки новых конструктивных решений в области летательных аппаратов малого размера. Учет данных факторов позволяет улучшить аэродинамическое качество и повысить эффективность эксплуатации летательных аппаратов.

Список литературы

1. Schlichting H., Gersten K. *Boundary-Layer Theory*. – 8th ed. – Berlin: Springer, 2017. – 805 p. – ISBN 978-3-662-52919-5.
2. White F.M. *Viscous Fluid Flow*. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2006. – 629 p. – ISBN 978-0-07-124493-0.
3. Mueller T.J., DeLaurier J.D. *Aerodynamics of small vehicles* // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2003. – Vol. 35. – P. 89–111. – DOI: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161102.
4. Lissaman P.B.S. *Low-Reynolds-number airfoils* // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 1983. – Vol. 15. – P. 223–239. – DOI: 10.1146/annurev.fl.15.010183.001255.
5. Rosenhead L. *Laminar Boundary Layers*. – Oxford: Clarendon Press, 1963. – 687 p.
6. Tani I. *Boundary-layer transition* // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 1969. – Vol. 1. – P. 169–196. – DOI: 10.1146/annurev.fl.01.010169.001125.
7. Gad-el-Hak M. *Flow control: Passive, active, and reactive flow management*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 422 p. – ISBN 978-0-521-77006-1.
8. Петров Г.И. *Аэродинамика тел малых размеров*. – М.: Наука, 1983. – 256 с.

9. Sirohi J. *Micro air vehicles* // *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. – Chichester: John Wiley & Sons, 2010. – DOI: 10.1002/9780470686652.eae238.
10. Rumsey C.L., Slotnick J.P. *Overview and summary of the Second AIAA High Lift Prediction Workshop* // *Journal of Aircraft*. – 2015. – Vol. 52, № 4. – P. 1006–1025. – DOI: 10.2514/1.C032661.
11. Бавбель, Е. И. Современные материалы для создания легких и устойчивых БПЛА / Е. И. Бавбель // *Научные исследования 2024* : сборник статей XIII Международной научно-практической конференции / МЦНС «Наука и просвещение». – Пенза, 2024. – С. 36–39.
12. Бавбель, Е. И. Анализ аэродинамических характеристик крыла беспилотного летательного аппарата / Е. И. Бавбель // *Глобальные вызовы и научные решения : сборник статей и тезисов Международной научно-практической конференции (12 марта 2026 г., г. Иркутск) / Омега сайнс. – Уфа, 2026. – С. 26–30.*
13. Бавбель, Е. И. Основные факторы, влияющие на эффективность беспилотных летательных аппаратов / Е. И. Бавбель // *Глобальные вызовы и научные решения : сборник статей и тезисов Международной научно-практической конференции (12 марта 2026 г., г. Иркутск) / Омега сайнс. – Уфа, 2026. – С. 31–35.*
14. Бавбель, Е. И. Подходы к проектированию БПЛА с повышенной выносливостью и грузоподъемностью / Е. И. Бавбель, А. А. Бородин, Е. В. Коляда // *Новые информационные технологии в научных исследованиях «НИИТ-2023» : материалы XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 22–24 ноября, 2023 г. : в 2 т. Т 2 / Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина. – Рязань, 2023. – С. 60–62.*
15. White F. *Fluid Mechanics* / F. White. – New York : McGraw-Hill Education, 2016. – 864 p.
16. Schlichting H. *Boundary-Layer Theory* / H. Schlichting, K. Gersten. – Berlin : Springer, 2017. – 805 p.
17. Pope S. *Turbulent Flows* / S. Pope. – Cambridge : Cambridge University Press, 2000. – 771 p.
18. McCormick B. *Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics* / B. McCormick. – New York : John Wiley & Sons, 1995. – 652 p.
19. Houghton E. *Aerodynamics for Engineering Students* / E. Houghton, P. Carpenter. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. – 688 p.

UDC 629.7

PATTERNS OF AIRFLOW AT LOW REYNOLDS NUMBERS

Bavbel E.I.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Viktor F. Alexeev – Cand. of Sci., assistant professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The paper considers the patterns of airflow at low Reynolds numbers. The features of boundary layer formation and the conditions of flow separation on aerodynamic profiles are described. The influence of the Reynolds number on aerodynamic characteristics of small aircraft is analyzed.

Keywords: Reynolds number, aerodynamics, boundary layer, laminar flow, aerodynamic profile.