

03

## Режимы обтекания вихревого генератора

© К.М. Велте, В.Л. Окулов, И.В. Наумов

Машиностроительный факультет Датского технического университета,  
ДК-2800, Люнгни, Дания  
Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия  
E-mail: vokulov@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 октября 2011 г.

Представлено полное параметрическое исследование возникновения мульти-вихревых режимов в следе за простейшим вихревым генератором. Оказалось, что вихревая структура в следе за генератором намного сложнее простого монополюсного кромочного вихря. Наличие вихрей в следе регистрировалось цифровой трассерной визуализацией (SPIV), по результатам которой впервые составлена карта режимов его обтекания, одна из областей которой, с развитой устойчивой многовихревой системой, затрагивает окрестность оптимального угла атаки вихревого генератора.

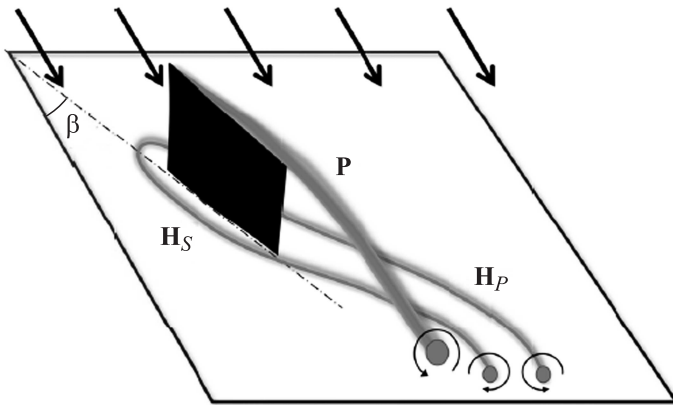
В последнее время использование вихревых генераторов в аэродинамике стало распространенным способом борьбы с отрывом пограничного слоя для различного рода обтекаемых поверхностей крыльев, лопаток турбин, сопел, диффузоров и пр. Как способ борьбы с отрывом потока вихревые генераторы были впервые введены Тейлором в 1974 г. [1] для подавления отрыва в диффузоре. Вихревой генератор представляет собой крыло малого удлинения, установленное нормально к обтекаемой поверхности под углом атаки к направлению набегающего потока так, чтобы за счет циркуляционного обтекания генератора формировался концевой продольный вихрь. При их применении возникновение отрыва существенно замедляется или устраняется за счет перераспределения продольного импульса движущейся среды. Такое формирование крупномасштабного вихревого движения в пограничном слое называется пассивным управлением отрывом потока. Наличие здесь положительного эффекта было подтверждено и исследовано для многих конфигураций вихревых генераторов и режимов их обтекания. Однако вихревые структуры, индуцируемые в потоке за генератором, до сих пор еще плохо изучены и идентифицированы. Для более эффектив-

ного моделирования и управления сформированным вихревым потоком этот пробел в исследованиях, конечно же, должен быть устранен.

Ранее при PIV-диагностике потока позади простой прямоугольной пластины — элементарного вихревого генератора на нескольких режимах его обтекания вдобавок к основному мощному кромочному продольному вихрю — авторы [2] наблюдали дополнительные вторичные вихревые структуры. Их наличие приводит к возмущениям и деформациям основного продольного вихря [2] и влияет на его положение [3–4]. Поэтому возникла необходимость более детального исследования вихревой структуры потока за вихревым генератором в более широком диапазоне режимных параметров его обтекания. Целью данной работы является обнаружение и объяснение причин формирования устойчивых многовихревых структур за прямоугольным вихревым генератором или крылом малого удлинения, обтекаемым в пристенном пограничном слое.

Исследования были выполнены в аэродинамической трубе и водном тестовом канале. Для испытаний в аэродинамической трубе использовалась стереоскопическая система цифровой трассерной визуализации (SPIV). Измерения были выполнены в поперечных сечениях вниз по потоку позади одиночного вихрегенератора — прямоугольного крыла. Экспериментальная установка с незначительными изменениями идентична установке, описанной в [2]. Угол атаки генератора к направлению набегающего потока изменялся в пределах от 9 до 54 градусов, с шагом 3. Дополнительно в данном исследовании была введена возможность изменения высоты генератора ( $h$ ) в диапазоне от 5 до 25 mm с шагом 5 mm. Длина лопасти ( $l$ ) при этом всегда была равной удвоенной высоте ( $2h$ ). Сечение, в котором проводились измерения, было расположено на расстоянии  $10h$  вниз по потоку от края вихревого генератора.

Дополнительно была проведена вспомогательная визуализация в водном канале на режимах с низким числом Рейнольдса около 400, рассчитанным по высоте генератора  $h_{VG} = 12$  mm и скорости набегающего потока  $U = 0.4$  m/s. Моделирование проводилось с целью выявления причин формирования многовихревых структур за генератором, поэтому при соблюдении геометрического подобия модели генератора и степени его погружения в пограничный слой другие параметры течения пунктуально не привязывались к выполнению основных измерений в аэродинамической трубе. В канале был обеспечен оптический доступ



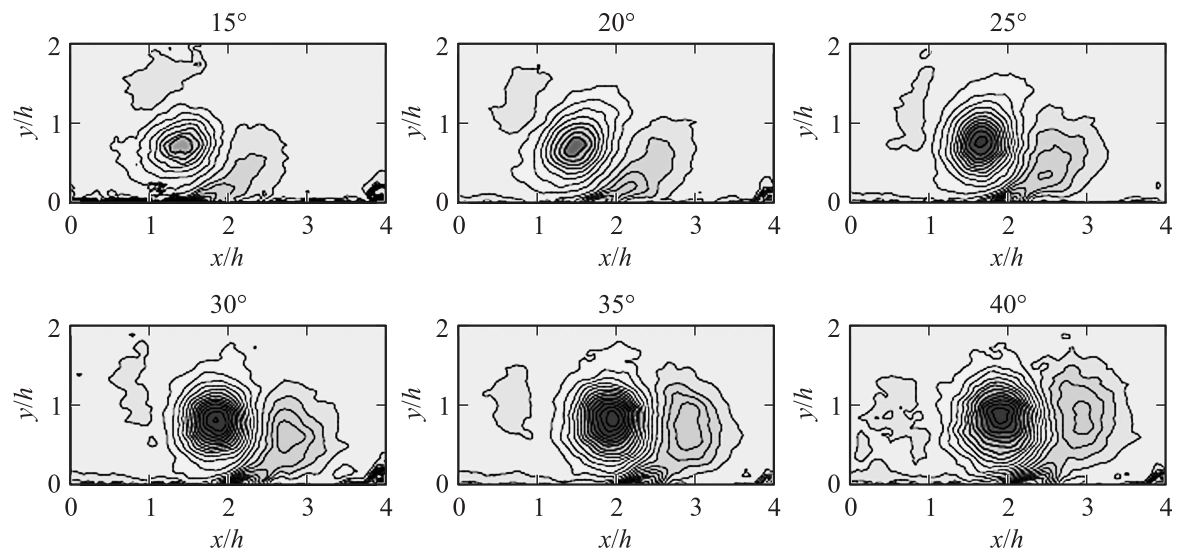
**Рис. 1.** Топология основной вихревой структуры, полученная на основе визуализации красителем.

на обеих боковых стенах и основании экспериментального участка. Размеры экспериментального участка составляли  $0.3 \times 1.5$  m с уровнем воды 0.2 m. На входе канала для формирования ламинарного течения установлены экраны и сотовидная структура — хонейкомб. Вихревой генератор с возможностью изменения угла атаки располагался в середине канала на вспомогательной пластине на расстоянии 7.5 cm от ее переднего края. Данная плоская пластина  $0.16 \times 0.30$  m использовалась для обеспечения обтекания генератора ламинарным пограничным слоем. Визуализация была выполнена пищевым красителем через шприцы для подкожных инъекций. Краска была залита в контейнер, связанный с иглой силиконовой трубкой, и под действием силы тяжести равномерно поступала в канал. Соответствие скорости выходящей краски скорости набегающего потока для минимизации вносимых возмущений регулировалось высотой положения контейнера с краской относительно канала.

По данным визуализации была определена основная вихревая структура, формируемая вихревым генератором. Она эскизно показана на рис. 1. Из-за циркуляционного обтекания установленной под углом атаки пластины с ее верхнего края срывается основной кромочный вихрь (**P**). Дополнительно распределение давления вокруг передней

кромки генератора формирует более слабый подковообразный вихрь с усами, проходящими с разных сторон от лопатки генератора вниз по потоку вдоль обтекаемой плоскости ниже кромочного вихря. Обозначим усы подковообразных вихрей, проходящих со сторон избыточного и недостаточного давления, через  $\mathbf{H}_P$  и  $\mathbf{H}_S$  соответственно. Наличие таких хорошо выраженных подковообразных вихрей также было выявлено, например, при обтекании лопаток у их завальцованного конца в осевых турбинах [5]. Из них потом формируется система межлопаточных вихрей. Для вихревых генераторов, из-за сильного влияния основного мощного кромочного вихря, вихри  $\mathbf{H}_P$  и  $\mathbf{H}_S$  ведут себя несколько по-другому, чем в осевых турбинах. На ранней стадии формирования более мощный основной вихрь  $\mathbf{P}$  захватывает ус вихря  $\mathbf{H}_S$  со стороны недостаточного давления и пронесит его под собой на сторону вихря избыточного давления  $\mathbf{H}_P$ , который развивается независимо от перестройки вихревой пары ( $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{H}_S$ ). В ходе визуализации также было выявлено, что подковообразный вихрь проявляется не для всех режимов обтекания. Это зависит, прежде всего, от угла атаки и относительной высоты генератора к толщине пограничного слоя. При определенных их значениях возмущения, вносимые лопастью, недостаточно сильны и приводят к тому, что оба уса подковообразного вихря не могут быть идентифицированы как вихри с отдельными ядрами, а проявляются только как сгустки завихрения на обтекаемой поверхности. Таким образом, две типичных конфигурации основных вихревых структур, состоящие из одного ( $\mathbf{P}$ ) или трех вихрей ( $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{H}_S$ ,  $\mathbf{H}_P$ ), могут проявиться в следе позади лопатки вихревого генератора.

Вниз по потоку от вихревого генератора в дополнение к описанной выше основной вихревой системе может возникнуть вторичная вихревая структура  $\mathbf{S}$ , формируемая сильным основным кромочным вихрем при его взаимодействии с пограничным слоем. Физический механизм этого процесса был описан в [6], а визуализация с превосходной одновременной идентификацией первичной и вторичной завихренности выполнена в [4]. При режимах, когда хорошо выделяется только основной продольный вихрь, образование вторичного вихря хорошо проиллюстрировано и в наших измерениях в аэродинамической трубе (рис. 2). При увеличении угла атаки генератора растет интенсивность кромочного вихря, а вместе с ней увеличивается его воздействие на пограничный слой. В результате справа растет область концентрации завихренности в пограничном слое так, чтобы в конечном итоге

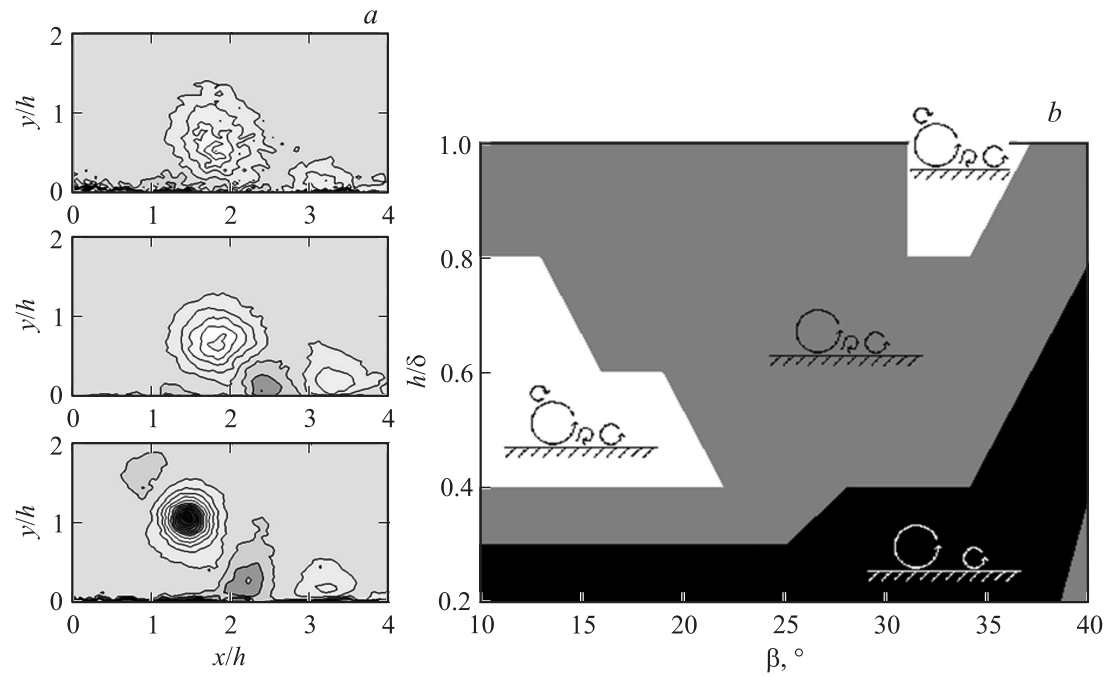


**Рис. 2.** Генерация вторичной вихревой структуры при увеличении угла атаки вихревого генератора.

отделиться и сформировать дополнительный дискретный вихрь. Этот результат согласуется с описанием механизма формирования вторичной вихревой структуры в [6], где отрицательный градиент давления, созданный между протяженным вихрем и поверхностью, может привести к отделению пограничного слоя и формированию вторичной концентрированной вихревой структуры противоположного знака. Параметры этой вторичной вихревой структуры в значительной степени зависят от интенсивности протяженного вихря и его расстояния до поверхности. Если интенсивность образованного вторичного вихря  $S$  достаточно сильна, то по той же схеме может сформироваться еще один вихрь  $D$ , циркуляция которого будет совпадать с циркуляцией первичной вихревой структуры. На рис. 2 второй вторичный вихрь изображен слева. Таким образом, для основного продольного вихря возможны три типичных режима с вторичной завихренностью: отсутствие вторичных вихрей ( $P$ ); существование одного вторичного вихря ( $P, S$ ) и три вихря ( $P, S, D$ ).

Таким образом, вихревая структура вниз по течению за генератором может быть представлена разным числом и сочетанием первичных и вторичных вихревых структур. Учитывая сложную динамику течения с возможностью перемежения и слияния отдельных вихрей друг с другом, предсказать заранее их число и взаимное расположение не представляется возможным. Поэтому было проведено полное параметрическое исследование мультивихревых структур в следе за моделью вихревого генератора. Регистрация вихревых структур в аэродинамической трубе выполнялась стереоскопической системой цифровой трассерной визуализации (SPIV). Режимы течения менялись путем изменения геометрических параметров вихревого генератора: угла атаки лопасти  $\beta$  и ее высоты  $h$ , отнесенной к толщине пограничного слоя  $\delta$ . В результате были обнаружены для вихревой системы за генератором три различных устойчивых режима. Примеры распределения аксиальной компоненты завихренности для этих режимов течения с возрастанием числа вихрей в следе показаны на рис. 3, *a*. Карта режимов обтекания вихревого генератора построена на рис. 3, *b*.

Первый режим содержит только два вихря одного знака на достаточном удалении друг от друга: первичный вихрь  $P$  и один ус подковообразного вихря со стороны избыточного давления на генераторе —  $H_P$ , который, как показала визуализация, развивается относительно независимо от взаимодействия пары ( $P, H_S$ ). Данный



**Рис. 3.** Примеры распределения завихренности в следе (слева) и карта режимов формирования различных вихревых структур (справа) в течении за вихревым генератором.

режим в основном фиксируется для относительно малых высот до 0.3 в окрестности оптимального угла атаки  $18^\circ$  или для низкопрофильных вихрегенераторов. Отсутствие второго уса  $H_S$  подковообразного вихря может быть объяснено тем, что основной вихрь для этого класса генераторов расположен слишком близко к плоскости и не пропускает вихрь  $H_S$  под собой, а просто „размазывает“ его по обтекаемой поверхности. Действительно, увеличение концентрации завихренности противоположного знака наблюдается вдоль поверхности стенки слева от основного вихря.

Другой хорошо воспроизводимый режим, где выделяются все три основных вихря ( $P$ ,  $H_P$  и  $H_S$ ), показан на среднем рисунке. Этот пример достаточно точно совпадает с результатом визуализации основной вихревой системы (рис. 1) и доминирует на карте режимов, расположенной справа на рис. 3. Образование вторичного вихря в этом случае либо тормозится вихрем  $H_S$ , либо полностью им поглощается, представляя трехвихревую структуру ( $P$ ,  $H_P$  и  $H_S + S$ ).

Последний режим не только воспроизводит трехвихревую систему второго режима, но и содержит добавочный вторичный вихрь  $D$ . Полная четырехвихревая структура ( $P$ ,  $H_P$ ,  $H_S + S$  и  $D$ ) занимает две области на карте режимов, одна из которых затрагивает окрестность оптимального угла атаки вихревого генератора.

Таким образом, в данной работе представлено полное параметрическое исследование возникновения мультिवихревых режимов в следе за простейшим вихревым генератором. Наличие вихрей в следе регистрировалось цифровой трассерной визуализацией (SPIV), по результатам которой впервые составлена карта режимов его обтекания. Оказалось, что вихревая структура в следе за генератором намного сложнее простого монополюсного кромочного вихря. Ее мнововихревой характер необходимо учитывать при проектировании вихревых генераторов, для построения теорий его воздействия на отрыв пограничного слоя и в численных расчетах.

Работа выполнена при частичной поддержке Датского энергетического агентства (проекты EUDP-2009-II, грант № 64009-0279 и EUDP-2009-J, грант № 64011-0094), проекта Министерства образования и науки РФ (ГК № 11.519.11.6022) и гранта РФФИ 10-08-01093.



**Список литературы**

- [1] *Taylor H.D.* // Research Department Report N R-4012-3. 1947. United Aircraft Corporation, East Hartford, Connecticut, USA.
- [2] *Velte C.M., Hansen M.O.L., Okulov V.L.* // J. Fluid Mech. 2009. V. 619. P. 167–177.
- [3] *Kramer W., Clercx H.J.H., van Heijst G.J.F.* // Physics of Fluids. 2007. V. 19. P. 126603.
- [4] *Harris D.M., Miller V.A., Williamson C.H.K.* // Physics of Fluids. 2010. V. 22. P. 091106.
- [5] *Langston L.S.* // Annals of the New York Academy of Sciences. 2001. V. 934. P. 11–26.
- [6] *Harvey J.K., Perry F.J.* // AIAA J. 1971. V. 9. N 8. P. 659–660.