**These experiments have been conducted in the subsonic open-return “Juju” wind tunnel located at the research facilities of Onera Toulouse. It features a low turbulence level 0.5x10-3 < *Tu* < 0.5x10-2 depending on the free-stream velocity, which ranges from 5 to 75 m/s. This facility operates at ambient conditions and is well suited for transition experiments. As illustrated in figure 1, a two-dimensional model based on an Onera-D symmetric profile, having a chord length of *c* = 0.35 m, is mounted horizontally in the test-section of the wind tunnel.**

Эти эксперименты были проведены в дозвуковой аэродинамической трубе открытого типа «Джуджу», расположенной на исследовательских объектах Онера-Тулуза. Он имеет низкий уровень турбулентности 0,5x10-3 <Tu <0,5x10-2 в зависимости от скорости набегающего потока, которая колеблется от 5 до 75 м / с. Эта установка работает в условиях окружающей среды и хорошо подходит для экспериментов по переходу. Как показано на рисунке 1, двумерная модель на основе симметричного профиля Onera-D, имеющая длину хорды с = 0,35 м, установлена горизонтально в испытательном участке аэродинамической трубы.

**The angle of attack can be adjusted between *α* = -8 ° and *α* = +3 °, in order to modify the pressure gradient and thus the natural transition location. Additionally, the model is equipped with 15 pressure taps on the upper side**

Угол атаки может быть отрегулирован между α = -8 ° и α = +3 °, чтобы изменить градиент давления и, таким образом, место естественного перехода. Дополнительно модель оснащена 15 кранами на верхней стороне.

**The DBD plasma actuator used during this experiment consists of a 5 mm-thick dielectric layer (blue insert in figures 1 and 2) made of Lab850 material, placed at the leading edge region and matching the model shape. This insert allows the model to be outfitted with the desired number of DBD actuators, adhering electrodes asymmetrically on both sides of the dielectric material. For example, figure 2 shows one single DBD actuator located at *x/c* = 10 % (the downstream edge of the air-exposed electrode is taken as the location reference).**

Плазменный привод DBD, использованный в этом эксперименте, состоит из диэлектрического слоя толщиной 5 мм (синяя вставка на рисунках 1 и 2), изготовленного из материала Lab850, размещенного в области переднего края и соответствующего форме модели. Эта вставка позволяет оснастить модель требуемым количеством приводов DBD, асимметрично приклеивая электроды с обеих сторон диэлектрического материала. Например, на рисунке 2 показан один единственный привод DBD, расположенный при x / c = 10% (нижний край воздушного электрода принимается в качестве эталона местоположения).

**The electrodes are 30 cm-long in spanwise direction and made of copper tape. The air-exposed electrodes are connected to a TREK power amplifier (model 30/20, ±30 kV, 20 mA peak) and supplied with AC high voltage, while other electrodes are grounded. Moreover, these air-exposed electrodes have been polished, in order to reduce their thickness down to 0.05 mm to prevent them from promoting transition. This value is one order of magnitude lower than the displacement thickness of the boundary layer measured at *x/c* = 10 % in the two following experiments. Hot wire anemometry (Dantec Streamline, 90C10 CTA modules, 55P15 probes) has been employed for boundary-layer explorations.**

Электроды длиной 30 см в продольном направлении изготовлены из медной ленты. Воздухонепроницаемые электроды подключены к усилителю мощности TREK (модель 30/20, ± 30 кВ, пик 20 мА) и питаются от высокого напряжения переменного тока, в то время как другие электроды заземлены. Кроме того, эти электроды, подвергшиеся воздействию воздуха, были отполированы, чтобы уменьшить их толщину до 0,05 мм, чтобы предотвратить их переход. Это значение на один порядок меньше толщины смещения пограничного слоя, измеренной при x / c = 10% в двух следующих экспериментах. Анемометрия с горячей проволокой (Dantec Streamline, модули 90C10 CTA, датчики 55P15) использовалась для исследования пограничного слоя.

**The study presented in this section is related to 2D boundary-layer stabilization using the plasma actuator in a continuous mode of operation. In this way, a quasi-steady momentum is added to the flow, directly acting on the mean velocity profile of the boundary layer, in such a way that the amplification of the disturbances is impeded and transition can be delayed. For example, this approach has been successfully applied on a flat plate with artificially excited disturbances [9]. In fact, the actuator induces unsteady momentum at the same frequency than the high-voltage signal. This feature is used in the second part of this paper (unsteady actuation). Nevertheless, the effect of the actuator can be considered as quasi-steady in this first experiment, because the operating frequency of the actuator is high compared to the most unstable frequencies of the boundary layer. Wind tunnel investigations**

Исследование, представленное в этом разделе, относится к 2D стабилизации пограничного слоя с использованием плазменного привода в непрерывном режиме работы. Таким образом, к потоку добавляется квазистационарный импульс, непосредственно воздействующий на профиль средней скорости пограничного слоя, таким образом, что усиление возмущений затрудняется и переход может быть отложен. Например, этот подход был успешно применен на плоской пластине с искусственно возбужденными возмущениями [9]. Фактически, исполнительный механизм вызывает нестационарный импульс на той же частоте, что и сигнал высокого напряжения. Эта функция используется во второй части статьи (неустановившееся срабатывание). Тем не менее, эффект привода может рассматриваться как квазистационарный в этом первом эксперименте, поскольку рабочая частота привода высока по сравнению с наиболее нестабильными частотами пограничного слоя. Исследования в аэродинамической трубе

**In a first step, boundary-layer transition delay is investigated experimentally using one single DBD actuator located at *x/c* = 10 % and operated continuously. The angle of attack of the model is set to *α* = 2.5 ° and the experiment has been performed for two different freestream velocities *U∞* = 7 & 12 m/s. The plasma actuator is supplied with AC high voltage having three different amplitudes *VDBD* = 8.5; 12 and 17 kV and an operating frequency set to *fDBD* = 2 kHz. The maximum velocity of the ionic wind induced by the actuator in quiescent air is about 4.5 m/s at the highest voltage amplitude. Figures 3a and 3b present typical results for *U∞* = 7 & 12 m/s. Velocity fluctuations are computed from boundary-layer explorations along the chord, moving the hot-wire probe at a constant distance from the wall, with and without control. The location of the transition is deducted from the fluctuation increase. The natural transition is located at *x/c* ≈ 40 % for *U∞* = 7 m/s and at *x/c* = 26 % for *U∞* = 12 m/s. In all cases, the ignition of the plasma actuator leads to a transition delay. As expected, the transition is shifted progressively downstream when the amplitude of the voltage is increased, since the mechanical effect of the actuator (ionic wind) increases. The maximum transition delays recorded during this experiment are 35 % of the chord for *U∞* = 7 m/s and 20 % of the chord for *U∞* = 12 m/s.**

На первом этапе задержка перехода пограничного слоя исследуется экспериментально с использованием одного привода DBD, расположенного при x / c = 10% и работающего непрерывно. Угол атаки модели установлен равным α = 2,5 °, и эксперимент был проведен для двух различных скоростей свободного потока U∞ = 7 и 12 м / с. Плазменный привод снабжен переменным высоким напряжением, имеющим три разные амплитуды VDBD = 8,5; 12 и 17 кВ и рабочая частота установлена ​​на fDBD = 2 кГц. Максимальная скорость ионного ветра, создаваемого приводом в неподвижном воздухе, составляет около 4,5 м / с при максимальной амплитуде напряжения. На рисунках 3a и 3b представлены типичные результаты для U∞ = 7 и 12 м / с. Колебания скорости рассчитываются по исследованиям пограничного слоя вдоль хорды, перемещая датчик горячей проволоки на постоянном расстоянии от стены, с контролем и без него. Место перехода вычитается из увеличения флуктуации. Естественный переход расположен при x / c ≈ 40% для U∞ = 7 м / с и при x / c = 26% для U∞ = 12 м / с. Во всех случаях зажигание плазменного привода приводит к задержке перехода. Как и ожидалось, переход постепенно смещается вниз по потоку, когда амплитуда напряжения увеличивается, поскольку механический эффект привода (ионный ветер) увеличивается. Максимальные задержки перехода, зарегистрированные во время этого эксперимента, составляют 35% хорды для U∞ = 7 м / с и 20% хорды для U∞ = 12 м / с.

**In order to confirm that this transition delay is due to the modification of the mean velocity profile, the control of the boundary layer with steady actuation has been investigated from a numerical point of view. First, boundary-layer computations have been performed for the baseline cases (without plasma) using an Onera code (3C3D, [17]). Then, an artificial ionic wind profile with a simple model (previously described in [20]) has been numerically added at the location of the actuator (*x/c*=10 %) to the mean velocity profiles obtained from these base flow computations, in such a way that the resulting profiles fit the experimental ones. Finally, exact stability computations have been conducted on these modified profiles, using the envelope strategy so as to compute the amplification *N*-factor with an Onera code (Castet, [16]).**

Чтобы подтвердить, что эта задержка перехода обусловлена ​​изменением профиля средней скорости, управление пограничным слоем с устойчивым приведением в действие было исследовано с числовой точки зрения. Во-первых, расчеты пограничного слоя были выполнены для базовых случаев (без плазмы) с использованием кода Onera (3C3D, [17]). Затем профиль искусственного ионного ветра с простой моделью (ранее описанной в [20]) был добавлен в цифровом виде в месте расположения привода (x / c = 10%) к профилям средней скорости, полученным из этих расчетов базового потока, в таким образом, что полученные профили соответствуют экспериментальным. Наконец, для этих модифицированных профилей были проведены точные расчеты стабильности с использованием стратегии огибающей, чтобы вычислить N-фактор усиления с помощью кода Onera (Castet, [16]).

**To describe the laminar-turbulent transition, it is common practice to distinguish three successive processes. The first, taking place close to the leading edge, is the receptivity. It describes the means by which external disturbances (such as free-stream turbulence or noise, as well as wall surface imperfections) excite the eigenmodes of the boundary layer. In the following amplification phase, these eigenmodes develop into periodic waves, which are convected in the streamwise direction. Some of them are exponentially amplified and will trigger transition further downstream. Their evolution is well described by the linear stability theory. When the amplitude of the waves is large, non-linear interactions occur and rapidly lead to turbulence (third step). Within the framework of classical linear stability theory, disturbances are introduced as:**

Чтобы описать ламинарно-турбулентный переход, обычной практикой является выделение трех последовательных процессов. Первый, имеющий место вблизи переднего края, - это восприимчивость. Он описывает способы, с помощью которых внешние возмущения (такие как турбулентность или шум в свободном потоке, а также несовершенства поверхности стенки) возбуждают собственные моды пограничного слоя. В следующей фазе усиления эти собственные моды развиваются в периодические волны, которые конвектируются в продольном направлении. Некоторые из них экспоненциально усиливаются и вызывают переход дальше вниз по течению. Их эволюция хорошо описывается теорией линейной устойчивости. Когда амплитуда волн велика, возникают нелинейные взаимодействия, которые быстро приводят к турбулентности (третий шаг). В рамках классической теории линейной устойчивости возмущения вводятся как:

**where *q*′ is a fluctuation (velocity, pressure or temperature) and *q*ˆ its amplitude function (here *x* is perpendicular to the leading edge and *y* is normal to the wall). Considering the spatial theory, α α α= *i* +*i i* is the complex wave-number in the *x* direction. The spanwise wave-number *β* and frequency *ω* are real. Introducing expression (1) in the NavierStokes equations leads to a system of ordinary differential equations for the amplitude functions. The stability of the flow depends on the value of the imaginary part of the longitudinal component of the amplification vector α*i* . When positive, the flow will be stable; when negative, the perturbation will be amplified until the transition is triggered. To quantify the amplification of disturbances, it is common practice to introduce the so-called *N*-factor given by relation (2), where *A* is the amplitude of the disturbance at a streamwise position *x*. Physically, the *N*-factor describes the total amplification rate of small disturbances along the propagation path. Considering a low velocity two-dimensional flow, only two-dimensional waves (*β*=0) need to be considered (the *N*-factor is simply computed by integrating –α*i* in the streamwise direction), since Squire’s theorem states that they are the most relevant ones.**

где q ′ - флуктуация (скорость, давление или температура), а qˆ - ее функция амплитуды (здесь x перпендикулярен передней кромке, а y - нормали к стенке). Учитывая пространственную теорию, α α α = i + i i - комплексное волновое число в направлении x. Размах волнового числа β и частота ω действительны. Введение выражения (1) в уравнения Навье-Стокса приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений для амплитудных функций. Устойчивость потока зависит от значения мнимой части продольной составляющей вектора усиления αi. Когда положительный, поток будет стабильным; при отрицательном значении возмущение будет усиливаться до тех пор, пока не сработает переход. Для количественной оценки усиления возмущений обычной практикой является введение так называемого N-фактора, определяемого соотношением (2), где A - амплитуда возмущения в продольном положении x. Физически, N-фактор описывает общую скорость усиления небольших возмущений вдоль пути распространения. Учитывая низкоскоростное двумерное течение, необходимо рассматривать только двумерные волны (β = 0) (N-фактор просто вычисляется путем интегрирования –αi в направлении потока), поскольку теорема Сквайра утверждает, что они являются наиболее соответствующие.

**As explained previously, an artificial ionic wind profile with a simple model is added to the mean velocity profile of the base flow boundary layer, at the location of the actuator (*x/c* = 10 %). Downstream, the boundary layer is solved by the code with the usual equations. As illustrated in figure 4, three parameters define the ionic wind model:**

Как объяснялось ранее, профиль искусственного ионного ветра с простой моделью добавляется к профилю средней скорости пограничного слоя основного потока в месте расположения привода (x / c = 10%). Вниз по течению пограничный слой решается кодом с обычными уравнениями. Как показано на рисунке 4, три параметра определяют модель ионного ветра:

**Typical results of the linear stability analysis are given in figure 5, which presents the evolutions of the *N*-factor along the chord of the model for several instability frequencies in the baseline case (a) and for the controlled case (b). The aerodynamic configuration is the same as that for the case presented in figure 3b) with *U∞* = 12 m/s. Since the natural transition location is known from the experiment (*xt/c* ~ 26 % or *xt* = 0.09 m), we can deduce the corresponding transition *N*-factor *Nt* = 5.8. Then, using this value in the controlled case plot, we can observe that the transition location is shifted downstream (*xt* = 0.22 m), not far from what has been observed experimentally (*xt* = 0.16 m). This stability analysis for the controlled case has been performed using ionic wind model parameters that are very close to the experimental values (*u*plasma = 4m/s, *y*max = 1.2 mm). The difference between measured and predicted transition locations could be explained by the relative simplicity of the ionic wind model used here. A new model that takes into account the real spatial force distribution induced by the actuator would provide a better consistency in the results. In conclusion, stability computations as well as experiments show that DBD plasma actuators used in a steady mode have a stabilizing effect on the boundary layer. The modification of the mean velocity profiles is such that the amplification of the disturbances is impeded and transition can be delayed**

Типичные результаты анализа линейной устойчивости приведены на рис. 5, где представлены эволюции N-фактора вдоль хорды модели для нескольких частот неустойчивости в базовом случае (а) и для контролируемого случая (б). Аэродинамическая конфигурация такая же, как и для случая, представленного на рисунке 3b) с U∞ = 12 м / с. Поскольку место естественного перехода известно из эксперимента (xt / c ~ 26% или xt = 0,09 м), мы можем вывести соответствующий N-фактор перехода Nt = 5,8. Затем, используя это значение на графике контролируемого случая, мы можем наблюдать, что место перехода смещено вниз по течению (xt = 0,22 м), недалеко от того, что наблюдалось экспериментально (xt = 0,16 м). Этот анализ устойчивости для контролируемого случая был выполнен с использованием параметров модели ионного ветра, которые очень близки к экспериментальным значениям (uplasma = 4 м / с, ymax = 1,2 мм). Разница между измеренными и предсказанными точками перехода может быть объяснена относительной простотой используемой здесь модели ионного ветра. Новая модель, которая учитывает реальное пространственное распределение силы, вызванное приводом, обеспечит лучшую согласованность результатов. В заключение, расчеты стабильности, а также эксперименты показывают, что плазменные приводы DBD, используемые в установившемся режиме, оказывают стабилизирующее воздействие на пограничный слой. Модификация профилей средней скорости такова, что усиление возмущений затруднено и переход может быть отложен

**Another way to delay 2D transition is to use unsteadily operated actuators to act (or counteract) directly on the Tollmien-Schlichting waves growing inside the boundary layer and triggering transition. This approach is called Active Wave Cancellation: the goal is to generate an artificial perturbation with an unsteady force production, so as to damp natural TS waves by destructive interference. Transition is delayed because the TS wave amplitude has been reduced locally. Grundmann and Tropea [10] have conducted experiments using this approach on a flat plate. They used a single high-frequency driven DBD actuator with square wave modulation to generate artificially introduced waves. A sufficiently large difference between the TS wave frequency (modulation frequency) and the operating frequency of the plasma actuator is essential for this operation mode. However, with increasing flow speed, the unstable frequency band will shift to a higher range correspondingly, until a sufficient difference between the carrier frequency and TS wave frequency cannot be maintained anymore. Another possible solution, as suggested by Grundmann in [11], is to make use of the DBD plasma actuator unsteady force production during one cycle of the operating frequency and to directly operate the cancellation actuator at the TS wave frequency. In fact, several experimental [7] [8] and numerical [3] [21] studies have shown that a DBD actuator produces a local unsteady force, mainly due to the different discharge regimes between the positive and the negative half cycles. This phenomenon became clear by analyzing the plasma actuator response electrically [18], or by using optical measurement techniques in the direct vicinity of the plasma region [6]. This asymmetric behavior allows the use of DBD actuators in direct frequency mode. A careful adjustment of the phase relation between the TS waves and the actuator excitation signal can thereby potentially cancel the waves. Thus, the use of an active control system with a closed-loop, which detects the waves and optimizes the actuation, will be necessary.**

Другой способ отложить 2D-переход состоит в использовании неустойчивых приводов для воздействия (или противодействия) непосредственно на волны Толлмина-Шлихтинга, растущие внутри пограничного слоя и запускающие переход. Этот подход называется «Активное аннулирование волн»: цель состоит в том, чтобы создать искусственное возмущение с нестационарным производством силы, чтобы демпфировать естественные волны TS разрушительными помехами. Переход задерживается, поскольку амплитуда волны TS локально уменьшена. Grundmann и Tropea [10] провели эксперименты с использованием этого подхода на плоской пластине. Они использовали один высокочастотный привод DBD с прямоугольной модуляцией для генерации искусственно введенных волн. Достаточно большая разница между частотой волны TS (частотой модуляции) и рабочей частотой плазменного привода является существенной для этого режима работы. Однако с увеличением скорости потока нестабильная полоса частот будет соответственно смещаться в более высокий диапазон, пока достаточная разница между частотой несущей и частотой волны TS больше не будет поддерживаться. Другое возможное решение, предложенное Grundmann в [11], заключается в использовании нестационарной выработки силы плазменного привода DBD в течение одного цикла рабочей частоты и непосредственном управлении приводом подавления на частоте волны TS. Фактически, некоторые экспериментальные [7] [8] и численные [3] [21] исследования показали, что привод DBD создает локальную нестационарную силу, в основном из-за различных режимов разряда между положительным и отрицательным полупериодами. Это явление стало ясно благодаря электрическому анализу отклика плазменного привода [18] или использованию оптических методов измерения в непосредственной близости от области плазмы [6]. Такое асимметричное поведение позволяет использовать приводы DBD в режиме прямой частоты. Тщательная регулировка фазового соотношения между волнами TS и сигналом возбуждения привода может, таким образом, потенциально отменить волны. Таким образом, будет необходимо использование активной системы управления с замкнутым контуром, которая обнаруживает волны и оптимизирует приведение в действие.

**The experimental set-up used for this study is quite the same as the one presented in the previous section, except that the angle of attack is set to *α* = 2 ° and that the model is outfitted with two DBD actuators, as illustrated in figure 6. The upstream actuator DBD1 (*x/c* = 10 %) serves as a disturbance source to artificially excite a single frequency TS wave train, while DBD2 (*x/c* = 30 %) is utilized as the transition control device.**

Экспериментальная установка, использованная для этого исследования, практически такая же, как и в предыдущем разделе, за исключением того, что угол атаки установлен на α = 2 °, а модель оснащена двумя приводами DBD, как показано на рисунке. 6. Привод восходящего потока DBD1 (x / c = 10%) служит источником возмущения для искусственного возбуждения одночастотной последовательности волн TS, в то время как DBD2 (x / c = 30%) используется в качестве устройства управления переходом.

**The experiments have been split into two phases. During an initial testing phase, the feasibility of the direct frequency mode for active wave cancellation had to be verified. In order to do so, a set-up employing a beat frequency approach without the use of a closed-loop controller was chosen, reproducing the experiments of Grundmann and Tropea. This allows for time efficient parameter studies to find appropriate settings and the corresponding attenuation rates. In the second testing phase, transition delay on the wing model has been shown with closed-loop control applied.**

Эксперименты были разбиты на две фазы. На начальном этапе испытаний необходимо было проверить возможность использования режима прямой частоты для активного подавления волн. Для этого была выбрана установка, использующая подход с частотой биений без использования контроллера с обратной связью, воспроизводящий эксперименты Grundmann и Tropea. Это позволяет проводить эффективные исследования параметров, чтобы найти подходящие настройки и соответствующие скорости затухания. На втором этапе тестирования была показана задержка перехода на модели крыла с применением управления с обратной связью.

**For this set of measurements, the excitation frequency at the upstream actuator DBD 1 has been set to a value close to the naturally occurring TS frequencies (*fDBD1* = 250 Hz). As the artificially excited waves travel downstream, they reach the control actuator (DBD2), which was operated at a slightly shifted frequency (*fDBD2* = 251 Hz) in order to create a beat frequency with the two signals due to the continuously changing phase relation. Some typical results from these experiments are presented in figure 7 for a free-stream velocity of *U∞* = 7 m/s.**

Для этого набора измерений частота возбуждения на приводе DBD 1 восходящего потока была установлена на значение, близкое к естественным частотам TS (fDBD1 = 250 Гц). Когда искусственно возбужденные волны распространяются вниз по течению, они достигают исполнительного привода (DBD2), который работал на слегка смещенной частоте (fDBD2 = 251 Гц), чтобы создать частоту биений для двух сигналов из-за непрерывно изменяющегося соотношения фаз. Некоторые типичные результаты этих экспериментов представлены на рисунке 7 для скорости набегающего потока U∞ = 7 м / с.

**The hot wire measurements shown were taken at *x/c* = 40 % inside the boundary layer, at a wall-normal distance of *y* = 0.4 mm. The base flow case (left part of the plot) shows a low fluctuation level within the hot-wire signal of 0.015 m/s. With excitation (middle part of the plot), this disturbance level is raised to 0.076 m/s. Applying the control (right part of the plot), a slow oscillation of the amplitude of the TS waves develops farther downstream from the second actuator, with a maximum amplitude above that of the unaffected waves (amplification) and minimum amplitude below the unaffected wave (damping), resulting in an almost unchanged RMS-value of 0.074 m/s in this case. Figure 8 shows a time trace of the excited TS wave signal with smaller time scale (dashed line) compared to the base flow case (solid line), revealing that a clean TS wave train has been produced by DBD1. Two important results emerge from these experiments. First of all, the unsteady momentum production of the plasma actuator can be utilized to excite TS waves, if applied at the appropriate position, amplitude and a frequency that the flow is susceptible to. Secondly and most importantly, the direct frequency approach for flow control proved to be applicable and can be utilized for active wave cancellation.**

Показанные измерения для горячей проволоки были выполнены при x / c = 40% внутри пограничного слоя, на нормальном расстоянии от стены y = 0,4 мм. Случай базового потока (левая часть графика) показывает низкий уровень флуктуаций в сигнале горячей проволоки 0,015 м / с. При возбуждении (средняя часть графика) этот уровень возмущения повышается до 0,076 м / с. Применяя управление (правая часть графика), медленное колебание амплитуды волн TS развивается дальше по потоку от второго исполнительного механизма, с максимальной амплитудой выше, чем у незатронутых волн (усиление), и с минимальной амплитудой ниже незатронутой волны ( демпфирование), что приводит к почти неизменному среднеквадратическому значению 0,074 м / с в этом случае. На рисунке 8 показана временная трасса сигнала возбужденной волны TS с меньшим масштабом времени (пунктирная линия) по сравнению со случаем базового потока (сплошная линия), показывающая, что DBD1 создал чистую серию волн TS. Из этих экспериментов вытекают два важных результата. Прежде всего, создание нестационарного импульса плазменного привода может быть использовано для возбуждения волн ТС, если оно применяется в подходящем положении, амплитуде и частоте, к которой восприимчив поток. Во-вторых, и самое главное, прямой частотный подход для управления потоком оказался применимым и может использоваться для активного подавления волн.

**In order to have a permanent optimized phase shift between the TS waves generated by DBD1 and the controlling unsteady force induced by DBD2, a robust extremum-seeking control algorithm has been used. This algorithm, which has previously been successfully applied for flow control purposes [1], was supplied by the TU Berlin. The system utilizes the signal of a stationary hot wire probe (*x/c* = 40 %, *y* = 0.2 mm) as an error sensor to automatically optimize the control function. This control algorithm runs on a dSPACE real-time processing unit. Due to its robustness this algorithm is well suited to control artificially excited, single-frequency TS waves. By slowly and periodically deflecting the system out of its current operating point (perturbation), the gradient *f’* of the error signal is determined according to a change of the controlled variable, which in this case is the phase shift. The phase relation between the TS wave train and the flow structures created by the plasma actuator is then continuously adapted along this gradient, which drives the system into a minimum.**

Чтобы иметь постоянный оптимизированный фазовый сдвиг между волнами TS, генерируемыми DBD1, и управляющей нестационарной силой, вызванной DBD2, был использован надежный алгоритм управления поиском экстремума. Этот алгоритм, который ранее успешно применялся в целях управления потоком [1], был предоставлен TU Berlin. Система использует сигнал стационарного датчика с горячей проволокой (х / с = 40%, у = 0,2 мм) в качестве датчика ошибки для автоматической оптимизации функции управления. Этот алгоритм управления работает на модуле обработки в реальном времени dSPACE. Благодаря своей надежности этот алгоритм хорошо подходит для управления искусственно возбужденными одночастотными волнами TS. Медленно и периодически отклоняя систему от ее текущей рабочей точки (возмущение), градиент f 'сигнала ошибки определяется в соответствии с изменением контролируемой переменной, которая в этом случае является фазовым сдвигом. Фазовое соотношение между волновой цепью TS и структурами потока, создаваемыми плазменным приводом, затем непрерывно адаптируется вдоль этого градиента, что сводит систему к минимуму.

**Following the promising beat frequency experiments, closed-loop control has been applied in order to show the transition delay using the direct frequency approach. The free-stream velocity and the angle of attack remain at *U∞* = 7 m/s and *α* = 2 ° respectively. A spectral analysis of the stationary hot-wire signal reveals the frequency content of the flow, as shown in figure 9. The power spectral density is plotted in dB/Hz over frequency at a wall-normal position of *y* = 0.2 mm. In the base flow case (DBD1 off, DBD2 off) two frequency peaks, one at 250 Hz and a wider peak around 340 Hz, are prominent. These frequencies represent the naturally occurring TS waves present in the boundary layer for the given flow situation. However, as has been shown with linear stability analysis, well described in [13], frequencies around 340 Hz are damped downstream of DBD2, with the limit for the unstable frequency band being about 300 Hz. A frequency sweep in the unstable range revealed that an excitation at 280 Hz leads to the cleanest TS wave signal at the location of the error sensor. Consequently it was decided to use this frequency for the subsequent AWC experiments. Figure 9 shows that introducing the excitation at 10 % of the chord (DBD1 on, DBD2 off) produces the expected peak around 280 Hz, as well as an overall increase in the turbulence level as transition is being promoted. This increase is visible at the error sensor, since its location is close to the point of transition for the excited case (~ 47 % of the chord). Applying the control (DBD1 on, DBD2 on) the TS peak at 280 Hz can be reduced by about one order of magnitude. This effect is accompanied by a decreased overall turbulence level.**

После многообещающих экспериментов с частотой биений было применено управление с обратной связью, чтобы показать задержку перехода с использованием метода прямой частоты. Скорость набегающего потока и угол атаки остаются при U∞ = 7 м / с и α = 2 ° соответственно. Спектральный анализ стационарного сигнала горячей проволоки выявляет частотное содержание потока, как показано на рисунке 9. Спектральная плотность мощности представлена ​​в дБ / Гц на частоте в нормальном положении стенки y = 0,2 мм. В случае основного потока (DBD1 выключен, DBD2 выключен) видны два частотных пика, один при 250 Гц и более широкий пик около 340 Гц. Эти частоты представляют собой естественные волны TS, присутствующие в пограничном слое для данной ситуации потока. Однако, как было показано с помощью анализа линейной устойчивости, хорошо описанного в [13], частоты около 340 Гц затухают ниже по потоку от DBD2, а предел для нестабильной полосы частот составляет около 300 Гц. Развертка по частоте в нестабильном диапазоне показала, что возбуждение при 280 Гц приводит к чистейшему сигналу волны TS в месте расположения датчика ошибки. Следовательно, было решено использовать эту частоту для последующих экспериментов AWC. На рисунке 9 показано, что введение возбуждения на 10% хорды (DBD1 включено, DBD2 выключено) дает ожидаемый пик около 280 Гц, а также общее повышение уровня турбулентности по мере продвижения перехода. Это увеличение видно на датчике ошибки, так как его расположение близко к точке перехода для возбужденного случая (~ 47% от хорды). При применении управления (DBD1 включен, DBD2 включен) пик TS при 280 Гц может быть уменьшен примерно на один порядок. Этот эффект сопровождается снижением общего уровня турбулентности.

**Figure 10 depicts a typical result of the transition delay studies. The RMS-value of the longitudinal velocity fluctuations recorded at various downstream locations at a constant distance above the wall within the boundary layer is plotted. The dark blue curve (*◊*) represents the natural transition case with the onset of transition at about 60% of the chord, *i.e.*, neither the disturbance source nor the control actuator is operating. Turning on the disturbance source, the TS wave amplitude is significantly increased at *f* = 280 Hz, which moves the transition region upstream to about 40% of the chord (*□*). Then, with the control system active, the transition region can be shifted downstream significantly by about 10% of the chord length (*○*).**

Рисунок 10 изображает типичный результат исследований задержки перехода. Среднеквадратичное значение продольных флуктуаций скорости, зарегистрированных в различных расположениях ниже по течению на постоянном расстоянии над стеной в пограничном слое. Синяя кривая (represents) представляет случай естественного перехода с началом перехода около 60% хорды, т.е. ни источник помех, ни управляющий исполнительный механизм не работают. При включении источника помех амплитуда волны TS значительно увеличивается при f = 280 Гц, что перемещает переходную область вверх по течению примерно до 40% от хорды (□). Затем, когда система управления активна, переходная область может быть значительно смещена вниз по течению примерно на 10% длины хорды (○).

**Even though the unsteadiness of the force production of DBD plasma actuators is used in this work to conduct active wave cancellation, it cannot be neglected that a net force is produced, which modifies the mean flow, *i.e.*, the boundary-layer velocity profile. This modification can by itself lead to a stabilization of the boundary layer, as presented in the previous text section, hence the delay in the transition. Complementary measurements have been carried out in order to exclude possible boundary-layer stabilization due to continuous addition of momentum. To quantify this effect, the momentum generation of DBD2 has been measured in quiescent air, using Pitot-tube measurements. The maximum achievable velocity, 10 mm downstream of the active electrode, was determined to be ~ 0.6 m/s at the prescribed plasma frequency of 280 Hz using this electrode configuration, dielectric material and thickness. In order to deactivate the active wave cancellation and to quantify the effect of a pure momentum addition of this magnitude, the recorded average wall-jet velocity has been reproduced at a plasma frequency of 1 kHz using DBD2. This frequency is located well outside the unstable frequency range and is assumed not to have any destabilizing effect on the boundary layer. The transition delay due to continuous momentum addition is small compared to the effect of the active wave cancellation and is of the order of 1-2 % of the chord length. For higher Reynolds numbers, it can be assumed that this effect will be reduced even further. This experiment proves that the achieved results can clearly be attributed to the unsteady force production of the DBD plasma actuator and are not the result of a modified mean flow.**

Даже несмотря на то, что неустойчивость производства силы плазменных приводов DBD используется в этой работе для проведения активного подавления волны, нельзя пренебрегать тем, что создается чистая сила, которая изменяет средний поток, то есть профиль скорости пограничного слоя. Эта модификация сама по себе может привести к стабилизации пограничного слоя, как показано в предыдущем текстовом разделе, отсюда и задержка перехода. Дополнительные измерения были проведены, чтобы исключить возможную стабилизацию пограничного слоя из-за непрерывного добавления импульса. Чтобы количественно оценить этот эффект, генерация импульса DBD2 была измерена в неподвижном воздухе, используя измерения с помощью трубки Пито. Максимально достижимая скорость, 10 мм ниже по потоку от активного электрода, была определена как ~ 0,6 м / с при заданной плазменной частоте 280 Гц с использованием этой конфигурации электрода, диэлектрического материала и толщины. Для того, чтобы деактивировать подавление активной волны и количественно оценить эффект чистого импульсного прибавления этой величины, записанная средняя скорость пристенной струи была воспроизведена на частоте плазмы 1 кГц с использованием DBD2. Эта частота находится далеко за пределами нестабильного частотного диапазона и предполагается, что она не оказывает какого-либо дестабилизирующего воздействия на пограничный слой. Задержка перехода из-за непрерывного добавления импульса мала по сравнению с эффектом подавления активной волны и составляет порядка 1-2% от длины хорды. Для более высоких чисел Рейнольдса можно предположить, что этот эффект будет уменьшен еще больше. Этот эксперимент доказывает, что достигнутые результаты могут быть однозначно связаны с созданием нестационарной силы плазменного привода DBD и не являются результатом изменения среднего потока.

**The same experiment has been conducted with a higher free-stream velocity *U∞* = 20 m/s. The angle of attack has been slightly reduced to *α* = 1.5°, in order to have the natural transition location near *x/c* = 60 %, as for the previous case. This time the frequency of the disturbance source is set to fDBD1 = 1 kHz, which is close to the frequency of the most unstable perturbations for this aerodynamic configuration. The changes in the velocity fluctuation along the chord, shown in figure 11, prove that transition delay has been achieved (4% of the chord) using a DBD plasma actuator with a closed-loop control system**.

Тот же эксперимент был проведен с более высокой скоростью набегающего потока U∞ = 20 м / с. Угол атаки был немного уменьшен до α = 1,5 °, чтобы иметь место естественного перехода около x / c = 60%, как и в предыдущем случае. На этот раз частота источника помех установлена на fDBD1 = 1 кГц, что близко к частоте наиболее нестабильных возмущений для этой аэродинамической конфигурации. Изменения флуктуации скорости вдоль хорды, показанные на рисунке 11, доказывают, что задержка перехода была достигнута (4% от хорды) с использованием плазменного привода DBD с замкнутой системой управления.

**In this study, the ability of DBD plasma actuators to delay 2D boundary layer transition has been assessed, by means of either steady or unsteady actuation. On the one hand, wind tunnel investigations together with linear stability analysis have shown that a DBD actuator used in a steady mode has a stabilizing effect on the boundary layer. The modification of the mean velocity profiles is such that the amplification of the disturbances is impeded and transition can be delayed. A maximum transition delay of about 35 % of the chord has been achieved for low free-stream velocity (*U∞* = 7 m/s). On the other hand, an experiment has been performed using the unsteady force produced by the DBD actuator to achieve Active Wave Cancellation in direct frequency mode. With the help of a closed loop control system, a significant transition delay has been achieved, by damping artificial TS waves for free-stream velocities up to *U∞* = 20 m/s**

В этом исследовании была оценена способность плазменных приводов DBD задерживать двухмерный переход пограничного слоя с помощью стационарного или нестационарного срабатывания. С одной стороны, исследования в аэродинамической трубе вместе с анализом линейной устойчивости показали, что привод DBD, используемый в установившемся режиме, оказывает стабилизирующее воздействие на пограничный слой. Модификация профилей средней скорости такова, что усиление возмущений затруднено и переход может быть отложен. Максимальная задержка перехода около 35% хорды была достигнута при низкой скорости набегающего потока (U∞ = 7 м / с). С другой стороны, был проведен эксперимент с использованием нестационарной силы, создаваемой приводом DBD, для достижения активного подавления волн в режиме прямой частоты. С помощью системы управления с обратной связью была достигнута значительная задержка перехода путем демпфирования искусственных волн TS для скоростей набегающего потока до U∞ = 20 м / с.