



УДК 629.7.018.1

В.Е. Мошаров, В.Н. Радченко

*Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, Россия,
140180, г.Жуковский, ул. Жуковского д.1*

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Представлена история создания метода люминесцентных преобразователей давления в СССР и США. Метод позволяет бесконтактно измерять распределение давления на моделях летательных аппаратов в аэродинамических трубах.

БАРОИНДИКАТОРЫ, ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ, PSP

ВВЕДЕНИЕ

Начало 80-х можно считать временем появления нового экспериментального метода, позволяющего визуализировать поля давления на поверхности моделей летательных аппаратов, – метода люминесцентных преобразователей давления. Метод основан на явлении тушения люминесценции органических люминофоров кислородом воздуха. Для его реализации поверхность модели покрывается специальной краской, представляющей собой тонкий слой полимера, проницаемого для кислорода, и содержащего молекулы люминофора. Люминофор возбуждается светом соответствующей длины волны, и измеряется интенсивность люминесценции, которая обратно-пропорциональна давлению.

Явление тушения было открыто в 1935 году Каутским и Хиршем и тогда же было предложено использовать это явление для измерения концентрации кислорода [1, 2]. В последующие годы появилось много научных работ и изобретений, в которых рассматривались вопросы создания кислородного люминесцентного датчика, но ученые ЦАГИ Первушин Г.Е. и Невский Л.Б. оказались первыми, кто осознал, что это явление может использоваться для бесконтактного измерения давления газа, если концентрация кислорода в газе постоянна, в частности, для измерения давления воздуха. К началу 80-х в ЦАГИ был разработан первый сенсор, названный авторами бароиндикатором [3-5].

Точность измерения полей давления с помощью бариндикаторов оставляла желать лучшего. Причиной невысокой точности была и фотопленка, как средство регистрации интенсивности, и несовершенство первых сенсоров. Методика измерения была разработана для фотоаппарата с медленным механическим затвором. Во время светового импульса возбуждения затвор фотоаппарата был закрыт, затем затвор открывался, и в течение нескольких секунд регистрировалось послесвечение люминесцентного покрытия. Для возбуждения бароиндикаторов требовались большие энергии, приводящие к быстрой деструкции преобразователя.

Первая методика применения бароиндикаторов включала в себя два принципа, широко используемых и сегодня. Это опорный кадр (кадр без потока, при известном давлении) [4] и градуировка покрытия по дренажу (*in situ*). Интенсивность люминесценции покрытия зависит не только от давления, но и от толщины покрытия и от интенсивности возбуждения. Опорный кадр позволяет исключить эти факторы, правда, при условии, что интенсивность

возбуждения на опорном и рабочем (в потоке) кадрах в каждой точке поверхности модели была одной и той же. Градуировка *in situ* – вынужденная мера, оправданная, если покрытие не стабильно во времени, по поверхности модели или имеет большую температурную чувствительность.

Работа нашей группы (Орлов А.А., Мошаров В.Е., Радченко В.Н., Фонов С.Д.) над оптическим измерением давления была начата в 1983 году с попытки увеличить точность метода бароиндикаторов путем измерения времени затухания люминесценции. Работа с бароиндикаторами показала, что время затухания люминесценции зависит от энергии возбуждения, что невозможно было объяснить в рамках простейшей модели тушения. Стало ясно, что необходимо изучить физико-химические процессы, сопутствующие явлению тушения, и разработать высокостабильные сенсоры, отвечающие задачам аэродинамического эксперимента.

Работа велась в широкой кооперации с научными и учебными организациями СССР: ИХФ АН СССР, ИФХ АН УССР, ГИПИ ЛКП, КарГУ, МГУ. Лучший результат был достигнут с помощью ученых из Московского государственного университета (Кузьмин М.Г., Садовский Н.А.). Удалось существенно уменьшить температурную чувствительность сенсора. Это было сделано путем использования люминесценции динамически образуемых эксимеров пирена [6].

К 1990 г. ЦАГИ располагал работоспособной системой на основе молекул пирена, сшитых попарно, и силиконового каучука. (Сшивка молекул попарно была вынужденной мерой для предотвращения испарения молекул пирена в поток.) И в 1989 г. было решено администрацией ЦАГИ (Загайнов Г.И.) коммерциализировать технологию оптического измерения полей давления, что соответствовало новым политическим тенденциям в СССР. В номере журнала *Aviation Week & Space Technology* от 12 февраля появилась реклама нового метода измерения давления на поверхности аэродинамических моделей.

В 1980 году в журнале *Review of Scientific Instruments* была опубликована статья биологов Петерсона и Фицджеральда (John Peterson and Robert Fitzgerald) [7], в которой была продемонстрирована визуализация струек азота и кислорода при помощи люминесценции хроматографической пластинки с адсорбированным на ней органическим люминофором. В статье ничего не говорилось об измерении давления воздуха. Эта статья долгое время оставалась незамеченной, но именно она оказалась толчком для начала работ по разработке нового метода измерения давления в США в 1987 году.

Инициатором работы выступил Джим Краудер (Crowder J.P.), сотрудник Боинга, занимавшийся визуализацией течений на поверхности и имевший дело с люминесценцией. За помощью он обратился к профессору Вашингтонского университета (г. Сиэтл) Мартину Гутерману (Gouterman M.). Мартин Гутерман, известный специалист в химии порфиринов, имел опыт использования явления кислородного тушения для измерения концентрации кислорода в крови. Непосредственно разработкой покрытия занималась аспирантка Джанет Каванди (Janet Kavandi), будущий астронавт NASA [8-11].

Понятно, что Боинг живо откликнулся на рекламу нового метода измерения давления в журнале *Aviation Week & Space Technology* и в сентябре 1990 г. был организован демонстрационный эксперимент технологии ЦАГИ в Сиэтле. В эксперименте принимали участие сотрудники ЦАГИ: Орлов А.А., Мошаров В.Е., Фонов С.Д.

В лабораторной трансзвуковой трубе исследовалось обтекание профиля. Результаты оптического измерения сравнивались с дренажем. Покрытие PSP было нанесено небольшой полоской в центре профиля в области расположения дренажа. Затем повторный демонстрационный эксперимент был проведен в ЦАГИ в 1993 г. в промышленной аэродинамической трубе Т-128 [12].

Главным результатом совместных экспериментов явилось ускорение работ по PSP технологии, как с российской, так и с американской стороны.

В Вашингтонском университете для сенсорного покрытия был подобран новый, значительно более стойкий порфирин, а, главное, в 1997 году для связующего был изобретен

фторированный акриловый полимер (FIB), обладающий достаточно низкой энергией активации диффузии кислорода и, следовательно, низкой температурной чувствительностью [13].

В ЦАГИ были созданы двухканальные (двухцветные) сенсоры. Двухцветная краска содержит два люминофора: активный и опорный. Первый чувствителен к кислороду (давлению), а второй нечувствителен к давлению и люминесцирует с интенсивностью, прямо пропорциональной возбуждению. Оба люминофора возбуждаются излучением одной длины волны, но люминесцируют в разных спектральных областях, что обуславливает возможность раздельной регистрации двух изображений, например при помощи двух камер с соответствующими светофильтрами [14].

Применение двухцветной краски позволило сделать огромный шаг в повышении точности измерения давления. С двухцветной краской снимается требование того, чтобы интенсивность возбуждения на опорном и рабочем (в потоке) кадрах в каждой точке поверхности модели была одной и той же и, следовательно, деформации и перемещения модели, равно как, и нестабильность источника возбуждающего излучения не сказываются на измерении давления.

Работы ЦАГИ и Боинга вызвали настоящий бум работ по PSP во всех аэродинамических центрах. Пик интереса к PSP пришелся примерно на конец 90-х – начало 2000-х годов. Но, что интересно, из всего разнообразия исследовавшихся сенсоров сейчас широко используются только покрытия, разработанные в ЦАГИ и в Вашингтонском университете. Кроме ЦАГИ, покрытия на основе пирена и силиконового каучука используются в DLR и ONERA, а PSP на основе порфирина и FIB коммерчески производятся компанией ISSI. Компании ISSI принадлежит патент США на производство фторированного акрилового полимера FIB, выкупленный у Вашингтонского университета.

Оба сенсора имеют свои недостатки и преимущества. Для возбуждения пирена, в отличие от порфирина, требуется УФ-излучение с длиной волны < 350 нм, которое сильно поглощается стеклянными окнами, что создает определенные трудности. В то же время силиконовый каучук, который используется в сенсоре ЦАГИ, находится в высокоэластичном состоянии и не имеет температурных гистерезисов, которые наблюдаются в полимере FIB.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kautsky H., Hirsch H.** Detection of Minutest Amounts of Oxygen by Extinction of Phosphorescence. // *Z. Anorg. Allg., Chem.*, 1935. – 222. – P.126.
2. **Kautsky H.** Quenching of Luminescence by Oxygen. // *Trans. Faraday Soc.*, 1939. – V.s 35. – P. 216.
3. **Ардашева М.М., Невский Л.Б., Первушин Г.Е.** Состав для индикаторного покрытия. – АС СССР SU 1065452 А, 1981.
4. **Ардашева М.М., Невский Л.Б., Первушин Г.Е.** Методика визуализации распределения давления по поверхности модели с использованием органических люминофоров. // Сб. докладов. III Всесоюзная школа по методам аэрофизических исследований. – Новосибирск, 1982. – С. 103–107.
5. **Ардашева М.М., Невский Л.Б., Первушин Г.Е.** Метод измерения распределения давления с помощью индикаторных покрытий. // ПМТФ. – 1985. – № 4. – С. 24 – 30.
6. **Mosharov V., Kuzmin M., Orlov A., Radchenko V., Sadovskii N., Troyanovsky I., Basov L., Lyalin G.** Method and Device for Determining Field of Pressure of Continuos Fluid Medium on the Surface of an Object. EP 0478780 B1, date of filing 12.04.90.
7. **Peterson J., Fitzgerald R.** New Technique of Surface Flow Visualization Based on Oxygen Quenching of Fluorescence. *Rev. Sci. Instrum.* – 51(5). – 1980. – P. 670–671.
8. **Gouterman M., Kavandi J., Gallery J., Callis J.,** Surface Pressure Measurement by Oxygen Quenching of Luminescence. Patent US 5186046, EP 0472243 A2. Date of filing 20.08.90.

9. **Kavandi J., Callis J.B., Gouterman M.P., Khalil G., Wright D., Green E., Burns D. and McLachlan B.** Luminescent Barometry in Wind Tunnels. *Rev. Sci. Instrum.* – 61(11). – 1990. – P. 3340–3347.
10. **Kavandi J., Crowder J.P.** Pressure indicating paint for aerodynamic surface pressure measurements. // AIAA Paper 90–1516.
11. **Kavandi J.L.** Luminescence imaging for aerodynamic pressure measurements // Ph.D. Thesis, Chemistry Dept. – Univ. Washington, Seattle, WA, 1990.
12. **Современные** научные проблемы и технологии в гражданской авиации. 20 лет сотрудничества ученых России и компании Boeing (1993-2013) / Филиал корпорации "Боинг Раша, Инк." (США); Центральный фэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ) - М. : Наука, 2013. - 300 с.
13. **Gouterman M. P., Carlson B. W.** Acrylic and fluoroacrylic polymers for oxygen pressure sensing and pressure-sensitive paints utilizing these polymers. Patent US 5965642. Date of filing 03.11.1997.
14. **Lyonnet M., Deleglise B., Grenat G., Bykov A., Mosharov V., Orlov A., Fonov S.** The two-component PSP investigation on civil aircraft model in S2MA wind tunnel. // AGARD'97 Proceedings. – Seattle, USA, September 1997. AGARD-CP-601, 1998, – P. 30–1–30–8.

V.E. Mosharov and V.N. Radchenko

Central Aero-Hydrodynamic Institute (TsAGI), 140180, Zhukovsky, Russia

HISTORY OF PRESSURE SENSITIVE PAINT DEVELOPMENT

The history of development of the method of pressure sensitive paint in the USSR and the USA. The method allows non-contact measurement of the pressure distribution on the aircraft models in wind tunnels.

BAROINDIKATOR, PRESSURE SENSITIVE PAINT, PSP