



## МОДЕЛЮВАННЯ ПРИЗЕМНОГО ПОГРАНИЧНОГО ШАРУ АТМОСФЕРИ В АЕРОДИНАМІЧНИХ ТРУБАХ З КОРОТКОЮ РОБОЧОЮ ЧАСТИНОЮ

**Р.М. Павловський<sup>а</sup>, С.Г. Кузнецов<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> *Київський національний авіаційний університет  
пр. Космонавта Комарова 1, Київ, Україна, 03680.*

<sup>б</sup> *Донбаська національна академія будівництва і архітектури  
вул. Державіна 2, м. Макіївка, Україна, 86123.*

*E-mail: sergij\_kuznetsov@rambler.ru*

*Отримана 10 березня 2009; прийнята 27 березня 2009.*

**Анотація.** У статті представлена нова методика моделювання приземного пограничного шару атмосфери для аеродинамічних труб з короткою робочою частиною, з метою адаптувати лабораторні установки для випробувань будівельних об'єктів. Класичні авіаційні аеродинамічні труби мають короткі робочі секції (не менше висоти робочої частини) з низьким рівнем турбулентності. З вимог будівельної аеродинаміки стало зрозумілим, що для отримання точних результатів необхідно моделювати атмосферний пограничний шар. При проектуванні, сильний вітер, який піддається незначному впливу термальної стратифікації, є найбільш важливим. Тому наближений потік зазвичай ізотермальний, який моделює термально нейтральний атмосферний пограничний шар. Аеродинамічні труби, розроблені для створення цього типу потоку, класифікуються як аеродинамічні труби з пограничним шаром. Розробка нових генераторів вихорів дозволяє забезпечити безступінчасте регулювання товщини пограничного шару, використання одних і тих же генераторів вихорів, і за рахунок цього істотно розширення експериментальних можливостей існуючих чисельних авіаційних аеродинамічних труб з короткою робочою частиною, робить можливим виконання в цих аеродинамічних трубах метеорологічних досліджень.

**Ключові слова:** атмосферний пограничний шар, аеродинамічна труба, будівельна аеродинаміка, моделювання вітрового потоку.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЗЕМНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ С КОРОТКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТЬЮ

**Р.Н. Павловский<sup>а</sup>, С.Г. Кузнецов<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> *Киевский национальный авиационный университет  
пр. Космонавта Комарова 1, Киев, Украина, 03680.*

<sup>б</sup> *Донбасская национальная академия строительства и архитектуры  
ул. Державина 2, г. Макеевка, Украина, 86123.*

*E-mail: sergij\_kuznetsov@rambler.ru*

*Получена 10 марта 2009; принята 27 марта 2009.*

**Аннотация.** В статье представлена новая методика моделирования приземного пограничного слоя атмосферы для аэродинамических труб с короткой рабочей частью, с целью адаптировать лабораторные установки для испытаний строительных объектов. Классические авиационные аэродинамические трубы имеют короткие рабочие секции (не менее чем высота рабочей части) с низким уровнем турбулентности. Из требований

строительной аэродинамики понятно, что для получения точных результатов необходимо моделировать атмосферный пограничный слой. При проектировании сильный ветер, который подвержен незначительному влиянию термальной стратификации, является наиболее важным. Поэтому набегающий поток обычно изотермальный, который моделирует термально нейтральный атмосферный пограничный слой. Аэродинамические трубы, разработанные для создания этого типа потока, классифицируются как аэродинамические трубы с пограничным слоем. Разработка новых генераторов вихрей позволяет обеспечить бесступенчатое регулирование толщины пограничного слоя, использование одних и тех же генераторов вихрей, и за счет этого существенное расширение экспериментальных возможностей существующих многочисленных авиационных аэродинамических труб с короткой рабочей частью, делает возможным выполнение в этих аэродинамических трубах метеорологических исследований.

**Ключевые слова:** атмосферный пограничный слой, аэродинамическая труба, строительная аэродинамика, моделирование ветрового потока.

## MODELLING OF ATMOSPHERIC GROUND BOUNDARY LAYER IN SHORT AIR DYNAMIC TUBES WIND TUNNELS

R.N. Pavlovskiy<sup>a</sup>, S.G. Kuznetsov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Kiev's National University

*pr. Kosmonavta Komarova 1, Kiev, Ukraine, 03680.*

<sup>b</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

*Derzhavin str. 2, Makeyevka, Ukraine, 86123.*

*E-mail: sergij\_kuznetsov@rambler.ru*

*Received 10 March 2009; accepted 27 March 2009.*

**Abstract.** The paper represents a new method of modeling overground atmospheric boundary layer for air dynamic tubes with the short working part to adapt laboratory installations for constructions tests. Classic air dynamic tubes have short working sections (not less than the section height) with the low turbulence. From the wind engineering modeling requirements it is clear that to obtain exact results it is necessary to model the atmospheric boundary layer. When designing, the strong wind is subjected to tire insignificant influence of thermal stratification is the most important factor. That is why the running is flow is usually isothermal, which models thermally neutral atmospheric boundary layer. Aerodynamic tubes, elaborated for such a flow type are classified as the aerodynamic pipes with boundary layer. The new generator vortex gives the opportunity to provide the steeples regulation of boundary-layer thickness, the same vortex-generators using and at the expense of this experimental possibilities of the numerous existing aviation aerodynamic tubes with short operating section, enables to carry out the meteorological investigations in them.

**Key words:** atmospheric boundary layer, aerodynamic tubes, wind engineering, modelling wind flow.

### 1. Введение

В последние годы проектирование строительных объектов ставит сложные и оригинальные задачи, которые требуют научного подхода к их решению. Одним из таких аспектов является ветровое воздействие на здания и сооружения, часто определяемые методами физического моделирования, один из которых – моделирование в аэродинамической трубе. Классические авиационные аэродинамические трубы имеют короткие рабочие секции

(обычно около высоты рабочей части) с низким уровнем турбулентности. На заре существования строительной аэродинамики стало понятным, что для получения точных результатов необходимо моделировать атмосферный пограничный слой. Это было достигнуто путем использования длинных рабочих секций (не менее шести высот рабочей части), создания восходящего потока.

При проектировании сильный ветер, который подвержен незначительному влиянию

термальной стратификации, является наиболее важным. Поэтому набегающий поток – обычно изотермальный пограничный слой, которого моделирует термально нейтральный атмосферный пограничный слой. Аэродинамические трубы, разработанные для создания этого типа потока, классифицируются как аэродинамический трубы с пограничным слоем. Обычно такие трубы шириной 2 – 5 м, длина рабочей части (15 – 30 м) и используют воздух при атмосферном давлении, максимальные рабочие скорости обычно в диапазоне 10 – 50 м/с. В отличие от них, аэродинамические трубы с короткой рабочей частью используются с различными приспособлениями (шпили, вихревые генераторы и элементы шероховатости земной поверхности), размещаемые на входе в рабочую часть для генерирования приемлемых средних и турбулентных условий потока. Приспособления этого типа также используются для увеличения глубины пограничного слоя в аэродинамических трубах с длинной рабочей частью с целью создания пограничного слоя частичной высоты при изучении воздействия ветра на низкие здания. Приемлемые моделирование пограничного слоя в коротких рабочих секциях для низких конструкций достичь сложнее.

## 2. Основы моделирования пограничного слоя атмосферы

Моделирование пограничного слоя атмосферы – лабораторная установка, используемая при проектировании уникальной или сложной формы высотных строений и сооружений, зданий и застроек с целью определения ветровых нагрузок, характеристик аэроупругих колебаний, работоспособности инженерных систем. Установка также может быть использована с целью определения комфортности жизнедеятельности населения жилых кварталов, определения и улучшения состояния воздушной среды в городах.

Известны аэродинамические трубы с пограничным слоем для строительной аэродинамики, отличительной особенностью которых является большая длина рабочей части, необходимая для моделирования приземного атмосферного пограничного слоя

толщиной до 300 м в натурном измерении. Моделирование параметров обеспечивается с помощью плохо обтекаемых элементов и турбулизаторов течения (зубчатый барьер, шпили, имитаторы шершавости), которые располагаются перед рабочей частью трубы. Барьер, шпили и имитаторы шершавости создают возле пола зону отрыва аналогично естественным условиям. Для достаточного развития этой области имитаторы шершавости должны располагаться вдоль и поперек рабочей части длиной не меньше шести ее высот. Перед элементами шершавости располагают барьер и генераторы вихрей (шпили).

Недостатком этого устройства является то, что при необходимости изменения параметров пограничного слоя атмосферы, а именно распределения скорости и турбулентности воздушного течения по высоте, необходимо экспериментально подобрать и заменить барьер, шпили и имитаторы шершавости.

Наиболее близким к устройству, которое предлагается, является устройство «Рабочая часть аэродинамической трубы для ветровых инженерных исследований» [4]. Этот прототип используется в обычных авиационных аэродинамических трубах с короткой рабочей частью. В прототипе используется внутреннее пространство сопла, в который погружен сплошной плоский экран с элементами шершавости. С помощью устройств для крепления к стенкам аэродинамической трубы экран устанавливается в горизонтальном положении. Передняя кромка экрана с барьером и генераторами вихрей погружена в сопло аэродинамической трубы. В рабочей части экран имеет круглый вырез с расположенным в нем поворотным кругом с исследуемой моделью. Такое расположение экрана разделяет воздушное течение в рабочей части, при виде сбоку, на две части: верхнюю и нижнюю. Элементы крепления экрана к стенкам аэродинамической трубы имеют минимально возможные поперечные сечения с целью уменьшения их аэродинамического сопротивления.

Недостатком этого устройства является то, что так же, как и в первом случае, с целью изменения любого из параметров воздушного потока необходимо подобрать экспериментальным

путем новые элементы для моделирования пограничного слоя. Кроме того, остается также неиспользованной значительная площадь рабочей части, которая находится под экраном.

### 3. Лабораторное устройство

Задачей лабораторного устройства является усовершенствование моделирования атмосферного приземного пограничного слоя в аэродинамической трубе. Выполнение новых генераторов вихрей разрешает обеспечить бесступенчатое регулирование толщины пограничного слоя, использовать одни и те же генераторы вихрей и за счет этого существенно расширить экспериментальные возможности существующих многочисленных авиационных аэродинамических труб с короткой рабочей частью, делает возможным выполнение в этих аэродинамических трубах метеорологических исследований.

Поставленная задача решается следующими конструктивными способами:

- устройство содержит сплошной плоский экран с элементами шершавости;
- крепление экрана к стенкам аэродинамической трубы выполняется в горизонтальном положении;
- передняя кромка экрана с барьером и генераторами вихрей погружена в сопло аэродинамической трубы;
- в рабочей части экран имеет вырез в виде поворотного круга, на котором располагаются модели.

В этих условиях обеспечивается обтекаемость экрана как по верхней, так и по нижней поверхностям. В соответствии с конструктивным решением установленные на передней кромке экрана управляемые по углу наклона генераторы вихрей со средствами изменения местного угла обтекаемости имеют такую длину, при которой высота возмущения воздушного течения при максимальном местном угле обтекаемости обеспечивает предназначенную максимальную толщину пограничного слоя в рабочей части аэродинамической трубы. Рабочая поверхность экрана устанавливается ниже продольной оси симметрии аэродинамической трубы на расстоянии не меньшем типичного характерного размера главного объекта исследуемых моделей.

Каждая аэродинамическая труба имеет в своем контуре сопло для улучшения качества воздушного потока. За самой узкой ее частью располагают рабочую часть. Благодаря соплу в рабочей части существенно уменьшается начальная турбулентность, уравниваются скорости и направления движения течений в каждой точке, увеличивается средняя скорость течения по сравнению с входным сечением сопла. В промежуточных сечениях сопла между входом и выпуском потока линии течений (линии тока) имеют разное направление относительно продольной оси симметрии аэродинамической трубы. Так, в нижней части сопла (см. рис. 1) линии тока направлены снизу вверх. Поэтому при погружении в эту среду плоской пластины (экрана), его передняя кромка встречается с течением под углом атаки  $\gamma \approx 0^\circ \dots 40^\circ$ . Это создает условия для отрыва потока сверху над экраном за передней кромкой и, таким образом, формирует на экране модель приземного пограничного слоя.

Предложенное устройство состоит из сопла 1 аэродинамической трубы (рис. 1), рабочей части, которая в свою очередь имеет верхнюю 2а и нижнюю 2б части, диффузора 3, сплошного плоского экрана 4, на верхней поверхности которого закреплены элементы шершавости 5 и барьер 6. На передней кромке экрана шарнирно закреплены генераторы вихрей 7 с осью поворота 8. В круглом вырезе экрана в зоне рабочей части установлен поворотный круг 9, на котором располагается исследуемая модель 10. Поворотный круг 9 расположен над поворотным кругом 11 аэродинамической трубы, которые зафиксированы между собой с помощью крепления 12.

Крепление 12 выполнено в виде фермы из обтекаемых элементов, которые не мешают свободному движению воздуха в нижней части 2б рабочей части аэродинамической трубы. Соединенные жестко между собой оба поворотных круга 9 и 11 оборачиваются с помощью дистанционно управляемого электрического привода 13. Блок генераторов вихрей 7 имеет рычаг 14, который шарнирно соединен с приводом 15. Второй опорный конец привода 15 соединен шарнирно с неподвижным концом кронштейна 16.

Устройство работает таким образом: запускается аэродинамическая труба. В сопле 1, рабочей части 2а и 2б, диффузоре 3 устанавливается воздушное течение, которое взаимодействует с экраном 4, элементами шершавости 5, барьером 6, блоком генераторов вихрей 7. В сопле 1 формируется объемное течение воздуха, характерным признаком которого являются значительные углы наклона условных линий течения 17. Наибольшие местные углы наклона условных линий течения 17 приходятся на поперечное сечение сопла, в котором изменяется кривизна контуров сопла. Именно в этом месте находится блок генераторов вихрей 7. Как видно из рисунка 1, даже при углах наклона генераторов вихрей 7, близких нулю, местные углы обтекания приводят к генерации вихрей. Созданный таким образом возмущенный воздушный поток дальше по течению поступает на модель 10, которая установлена на поворотном круге экрана 9.

При местном угле обтекания управляемых генераторов вихрей  $\gamma \approx 0^\circ$  толщина пограничного слоя над верхней поверхностью экрана представляет минимальную толщину  $h_0$ , которая в данном случае практически будет определяться геометрическими параметрами барьера и элементами шершавости.

При подъеме генераторов вихрей к образованию местного угла обтекания, например,  $\gamma \approx 90^\circ$  (см. рис. 2), толщина пограничного слоя  $h$  на верхней поверхности экрана представляет максимальную толщину. Можно считать, что промежуточные значения толщины пограничного слоя  $h$  в рабочей части аэродинамической трубы определяются зависимостью:

$$h = h_0 + l \sin \gamma, \quad (1)$$

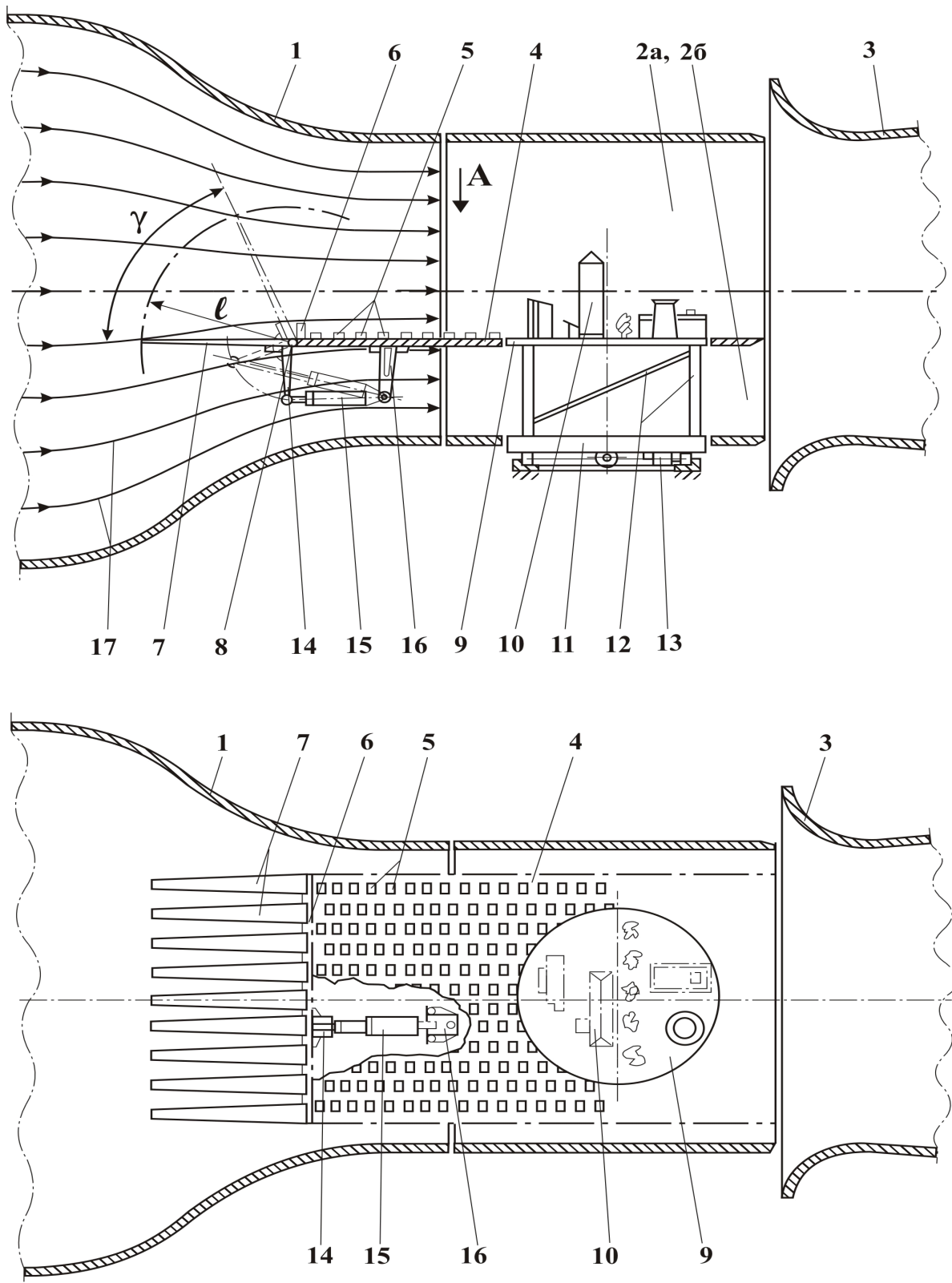
где  $l$  – длина генераторов вихрей (шпилей).

Конструкция средств изменения местного угла обтекания генераторов вихрей может быть разнообразной. Например, каждый из генераторов вихрей (их может быть, например, 5...20 шт. в зависимости от ширины рабочей части) может переставляться на другой угол наклона вручную. Каждый из генераторов или группа из нескольких, или все вместе могут изменять угол наклона дистанционно управляемым типичным гидравлическим или электрическим приводом. Конструкция средств изменения местного угла обтекания генерато-

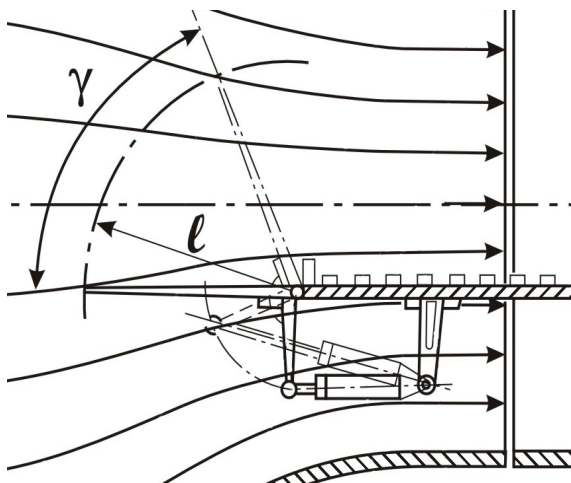
ров вихрей сама по себе не нуждается в специальной разработке. Например, в самолетостроительной промышленности широко распространены разнообразные компактные гидравлические и электрические приводы органов управления (элеронов, рулей высоты и направления полета, тримеров, закрылков, шасси, щитков торможения). Вторым отличием устройства является то, что управляемые за углом наклона генераторы вихрей имеют такую длину  $l$ , при которой высота возмущения воздушного течения при максимальном местном угле обтекаемости, например,  $\gamma \approx 90^\circ$ , обеспечивает предназначенную максимальную толщину пограничного слоя в рабочей части аэродинамической трубы. Максимальная толщина пограничного слоя  $d_{max}$  назначается с учетом размеров и особенностей компоновки рабочей части аэродинамической трубы, типичного характерного размера (высоты) главного объекта исследуемых моделей. При этом считается, что одним из важнейших факторов компоновки рабочей части аэродинамической трубы есть высота  $H$  проточного канала между рабочей (верхней) поверхностью экрана и верхней стенкой (верхней границей потока) рабочей части. Предельным максимальным соотношением максимальной толщины пограничного слоя  $d_{max}$  к высоте  $H$  проточного канала будет  $d_{max}/H = 1,0$ .

Третьим отличием устройства является то, что рабочая поверхность экрана установлена ниже продольной оси симметрии аэродинамической трубы на расстоянии не меньше типичного характерного размера (высоты) главного объекта исследуемых моделей. Такое расположение способствует более эффективному использованию общей площади поперечного сечения рабочей части аэродинамической трубы.

Следует заметить, что существует определенная предельная граница разделения рабочей части на верхний и нижний проточные воздушные каналы. Например, в случае приближения или прикосновения экрана к нижней плоской стенке рабочей части состоится глобальное разрушение воздушного течения в рабочей части по причине не рассчитанного режима работы сопла по формуле Витошинского. Окончательный выбор максимальной относительной допустимой высоты верхнего



**Рис. 1.** Схема лабораторной установки моделирования приземного пограничного слоя атмосферы: 1- сопло; 2 – рабочая часть; 3 – диффузор; 4 – экран; 5 – элементы шероховатости; 6 – барьер; 7 – генераторы вихрей; 8 – ось поворота; 9 – поворотный круг экрана; 10 – модели; 11 – поворотный круг трубы; 12 – крепление; 13 – электрический двигатель; 14 – рычаг; 15 – привод; 16 – кронштейн; 17 – линии тока.



**Рис. 2.** Изменение толщины пограничного слоя в устройстве моделирования приземного пограничного слоя атмосферы.

проточного канала должен опираться на соответствующие экспериментальные исследования.

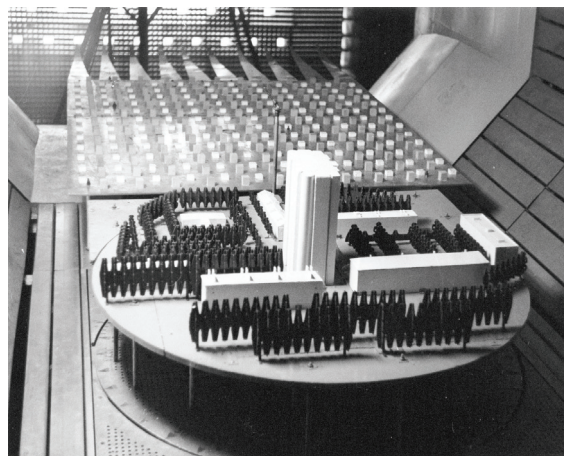
Следует также заметить, что более низкое расположение экрана в рабочей части аэродинамической трубы улучшает эксплуатационные условия во время установления и отладки элементов исследуемых моделей.

Наиболее эффективным внедрение устройств со вторым и третьим отличиями должны быть в аэродинамической трубе с линейными образующими (4-х, 6-ти, 8-ми гранями) поперечного сечения воздухопроводов, особенно сопла и рабочей части.

Сравнительный анализ с известными техническими решениями показал, что техническая реализация, которая предлагается, отличается наличием новых элементов, а именно, управляемых за углом наклона генераторов вихрей, средств изменения этого угла, например, в диапазоне,  $\gamma \approx 0^\circ \dots 90^\circ$ , определенностью оптимальной длины генераторов вихрей (шпилей) и наиболее эффективным расположением экрана по высоте рабочей части аэродинамической трубы.

В некоторых случаях, например, в соплах с большим коэффициентом подпора 8...20 введенное устройство может эффективно работать в более широком диапазоне углов, например, при  $\gamma \approx -20^\circ \dots 120^\circ$ .

В зависимости от программы исследований той или другой модели и масштаба моделирова-



**Рис. 3.** Пример реализации устройства моделирования приземного пограничного слоя атмосферы в аэродинамической трубе Киевского национального авиационного университета.

ния назначается определенная высота  $h$  или определенный ряд высот пограничного слоя  $h_i$ . Необходимая высота  $h$  задается дистанционно управляемым приводом 15 блока генераторов вихрей 7. При изменении длины рабочего конца штока привода 15 относительно неподвижного кронштейна 16 рычаг 14 вместе с блоком генераторов вихрей 7 вращается вокруг оси 8 на заданную величину  $g$ . После фиксации угла  $g$  выполняются исследование модели 10 при разных азимутальных углах обтекаемости модели в диапазоне  $0 \dots 360$ , что обеспечивается поворотом модели с помощью поворотного круга 11 с креплением 12 аэродинамической трубы и привода 13.

#### 4. Заключение

На основе приведенного метода моделирования приземного пограничного слоя атмосферы для масштабных испытаний строительных объектов можно сделать вывод, что совокупность существенных признаков, которые изложены в принципе устройства, есть необходимой и достаточной для достижения нового технического результата – бесступенчатого регулирования толщины пограничного слоя. Тем самым уменьшается продолжительность испытаний в аэродинамической трубе, необходимых на разработку новых вариантов генераторов вихрей (шпилей) для следующих исследуемых моделей.

**Литература**

1. Горлин С.М., Слезингер И.И. Аэромеханические измерения. Методы и приборы // . – Москва: - Наука, 1964.
2. Cook N.I. The designer's guide to wind loading of building structures. Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification // Butterworths . – London: 1990.
3. Niemann H.-J. The boundary layer wind tunnel: an experimental tool in building aerodynamics and environment engineering // Journal wind engineering and industrial aerodynamics. – Netherlands: Elsevier, 1993. – Vol. 48. P. 341–350.
4. Zhifu Gu, Yan Li, Minghui Cheng. Wind loads on glass cladding of a tower building // Wind engineering into 21st Century. – Rotterdam: Larsen, Larose & Livesey, 1999. P. 653–658.
5. Mugalev V.P. Simulation of surface-layer velocity fields and their influence on wake // Wind engineering into 21st Century. – Rotterdam: Larsen, Larose & Livesey, 1999. P. 653–658.
6. Павловский Р.Н., Виноградский П.М., Кузнецов С.Г., Артамонов П.В. Работа вентиляционных систем пятиэтажного здания под влиянием высотного здания // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. – Луганськ: ЛНАУ, 2005. – № 45(68). - С. 107–115.
7. Cook N.I. The designer's guide to wind loading of building structures: Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification // London: Butterworths, 1990.
8. Lawson T. Building aerodynamics // London: Imperial College Press. – 2001. – 286 p.

**Кузнецов Сергій Георгійович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри архітектури промислових і цивільних будівель Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: будівельна аеродинаміка, модельні випробування будівель і споруд в аеродинамічній трубі з пограничним шаром, вітрові навантаження на будівлі та споруди, натурні випробування вітрових навантажень.

**Павловський Роман Миколайович** – к.т.н., науковий співробітник, доцент кафедри аеродинаміки та льотної експлуатації аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету. Наукові інтереси: аеродинаміка (загальна та місцева), робочі характеристики гвинтів разом із натурними моторами, повітряні навантаження на окремі елементи та підвісні вантажі, вітрові навантаження, епюри швидкостей та напрямків повітряних потоків поблизу будівель та споруд.

**Кузнецов Сергей Георгиевич** – к.т.н., доцент, доцент кафедры архитектуры промышленных и гражданских зданий Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: строительная аэродинамика, модельные испытания зданий и сооружений в аэродинамической трубе с пограничным слоем, ветровые нагрузки на здания и сооружения, натурные исследования ветровых нагрузок.

**Павловский Роман Николаевич** – к.т.н., научный сотрудник, доцент кафедры аэродинамики и летной эксплуатации аэрокосмического института Национального авиационного университета. Научные интересы: аэродинамика (общая и местная), рабочие характеристики винтов вместе с натурными моторами, воздушные нагрузки на отдельные элементы и подвесные грузы, ветровые нагрузки, эпюры скоростей и направлений воздушных потоков около зданий и сооружений.

**Kuznetsov Sergey Georgievich** – the candidate of technical sciences, assistant professor, assistant professor of the "Architecture of Industrial and Civil Buildings" chair of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: aerodynamics engineering, modeling tests of buildings and structures by means of aerodynamic tube with the boundary layer, wind loads on buildings and structures, full-scale investigation of wind loads.

**Pavlovskiy Roman Nikolaevich** – the candidate of technical sciences, research fellow, assistant professor of the «Aerodynamics and Flying Exploitation» chair of Aerospace Institute of National Aviation University. Scientific interests: aerodynamics (general and local), working characteristics of screws together with natured motors, air loading on separate elements and suspended loads, wind loads, epures of velocities and directions of air flows directions near buildings and structures.