

УДК 532.517

Турик<sup>1</sup> В.Н. к.т.н., доц., Бабенко<sup>2</sup> В.В., д.т.н., проф., Воскобойник<sup>2</sup> В.А. д.т.н., с.н.с., Воскобойник<sup>2</sup> А.В., к.т.н., с.н.с.  
 1-НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина;  
 2-Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев, Украина

## ФОРМИРОВАНИЕ ЗАВИХРЕННОСТИ ВНУТРИ И ВБЛИЗИ ПОПЕРЕЧНО ОБТЕКАЕМОЙ ПОЛУЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРАНШЕИ НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Turick<sup>1</sup> V., Babenko<sup>2</sup> V., Voskoboinick<sup>2</sup> V., Voskoboinick<sup>2</sup> A.  
 1-National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (Turick46@gmail.com);  
 2-Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine (vlad.vsk@gmail.com)

### VORTICITY FORMATION INSIDE AND NEAR CROSS-STREAMLINED SEMI-CYLINDRICAL TRENCH ON FLAT SURFACE

*Рассмотрены особенности формирования поля завихренности внутри и вблизи поперечно обтекаемой полуцилиндрической траншеи на гидравлически гладкой плоской поверхности. Представлены результаты экспериментальных исследований осредненных и пульсационных составляющих поперечной завихренности, полученные для различных режимов течения в аэродинамической трубе. Исследования проводились с применением проволочного термоанемометра. Обнаружено, что наибольшие уровни осредненной завихренности наблюдаются вблизи обтекаемых поверхностей и в угловых областях стенки траншеи. Максимальные пульсации завихренности наблюдаются в области взаимодействия вихревых структур слоя смешения с квазиустойчивым крупномасштабным вихрем и особенно вблизи кормовой стенки*  
Ключевые слова: осреднённая и пульсационная завихренность, полуцилиндрическая траншея, проволочный термоанемометр, когерентные вихревые структуры, пограничный слой

#### Введение

В последние годы внимание разработчиков современного технологического оборудования, компактных теплообменных аппаратов, а также корпусов транспортных средств обращено к исследованию особенностей обтекания поверхностей с геометрическими неоднородностями определённых видов, в частности углублений различной формы (траншей и лунок) [1]. Это обусловлено выявленными возможностями существенного улучшения гидроаэродинамических и теплопередающих характеристик конструкций, а также снижения уровня нежелательных акустических возмущений при правильном выборе геометрических параметров углублений, их размещения на обтекаемых поверхностях и режимных факторов, в частности, числа Рейнольдса невозмущённого потока. Очевидно, такой выбор возможен только при достаточно глубоком понимании структуры течения в полостях углублений и вблизи их. В этом контексте важная роль отводится изучению завихренности, в том числе пульсаций завихренности, характерных для турбулентных потоков [2–4]. В общем виде завихренность определяется выражениями  $\omega_i = \Omega_i + \omega'_i = \partial u_k / \partial x_j - \partial u_j / \partial x_k$ , где координатные индексы при проекциях актуальных завихренности и скорости  $u_j$  предполагают циклическую перестановку;  $\Omega_i$  – осреднённые по времени компоненты завихренности;  $\omega'_i$  – пульсационные компоненты завихренности.

Лайтхилл в широко известной работе [5] первым ввел концепцию плотности потока завихренности и указал значение твердых границ в распределении источников и стоков завихренности. Поэтому многими исследователями, например в работах [6–8], при численном и физическом моделировании динамика вихревых структур в слоях смешения, сдвиговых слоях и в пограничных слоях интенсивно изучается при помощи изолиний или изоповерхностей завихренности. Лайтхилл также представил принципиальный механизм, объясняющий каким образом локальный градиент давления, тангенциальный к поверхности, может заставить первоначально не вращающийся элемент жидкости свернуться вдоль неподвижной стенки и получить завихренность благодаря условию прилипания на стенке. Прямые численные решения уравнений Навье-Стокса могут давать с большим или меньшим приближением полную трехмерную информацию о полях скорости и завихренности для равновесных турбулентных пограничных слоев при относительно низких величинах числа Рейнольдса потоков, к тому же, в условиях обтекания стенок не очень сложной геометрии. Однако адекватность решений резко уменьшается для случаев обтекания рельефных поверхностей с углублениями, особенно при развитом турбулентном течении. Это связано с математическими трудностями решения

нелинейных уравнений движения для данного класса задач (известные проблемы существования, единственности, устойчивости решений при высоких числах Рейнольдса) и недостаточной изученностью механизмов зарождения вихревых образований, их масштабов, эволюции, а также взаимодействия между собой и с пограничным слоем вблизи и внутри углублений при наличии срывных и ударных явлений. На сегодня нет сомнений, что именно когерентные вихревые структуры (КВС) играют важнейшую роль в формировании, обмене и диссипации турбулентной энергии, тем самым определяя процессы переноса в турбулентных потоках. Эти потоки содержат такое разнообразие масштабов и структур, которое невозможно определить без применения статистических методов изучения. Даже при некотором понимании структуры осредненного течения [1] требуется проведение тщательного поиска связей в статистических данных между мгновенными событиями и их особенностями. Поэтому для ряда приложений, безусловно, важна постановка детальных исследований механизмов генерации квазиустойчивых вихревых структур в углублениях.

#### Постановка задачи и цель исследований

В пристеночной области турбулентного пограничного слоя основной вклад в поперечную составляющую завихренности  $\omega_z = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$  вносит второе слагаемое, поскольку, согласно работе [9], отношение осредненных квадратов значений этих слагаемых  $\overline{(\partial u / \partial y)^2} / \overline{(\partial v / \partial x)^2}$  составляет около 860 при безразмерном удалении от стенки  $y^+ = u_\tau / \nu = 10$  и всего 34 при  $y^+ = 30$ , где  $u, v$  – продольная и поперечная составляющие скорости;  $y$  – текущая ордината по нормали к пластине;  $u_\tau$  – динамическая скорость;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости. Как указано в работе [9], значение градиента осредненной продольной скорости  $\partial U / \partial y$  является положительным (соответственно, значение осредненной завихренности  $\Omega_z$  – отрицательное) по всей толщине вязкого подслоя. В соответствии с работой [9], существует вероятность появления положительного значения  $\omega_z$ , которая для координаты  $y^+ \leq 10$  составляет менее 1%. Однако с увеличением расстояния от стенки, в буферной и логарифмической областях, время фиксирования отрицательных величин  $\frac{\partial u}{\partial y}$  быстро увеличивается, а для внешней области пограничного слоя толщиной  $\delta$  достигает значений порядка 40% общего времени регистрации независимо от относительной ординаты  $y / \delta$  [9, 10].

Обобщение уравнения Гельмгольца на случай движения вязкой несжимаемой жидкости даёт уравнение переноса, связывающее завихренность  $\omega_i$  с тензором скоростей деформации  $\dot{S}_{ik} = (\partial u_i / \partial x_k + \partial u_k / \partial x_i) / 2$ . Уравнение для завихренности  $\omega_i$  в системе координат Лагранжа получает вид

$$\frac{D\omega_i}{Dt} = \dot{S}_{ik}\omega_k + \nu \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial x_k^2},$$

где  $D / Dt = \partial / \partial t + u_k \partial / \partial x_k$  – субстанциональная производная.

Как видно, вязкостная сила, действующая на элемент несжимаемой жидкости, определяется локальными градиентами завихренности, таким образом, для интенсификации структуры турбулентности завихренность играет ключевую роль. Динамически значимыми процессами, связанными с завихренностью, являются те, что обеспечивают увеличение модуля вектора завихренности, его вращение за счёт приложенных напряжений и распад вихревых структур до очень малых масштабов, обусловленный вязкостью, которая, в свою очередь, при определённых условиях может вызывать, однако, и объединение вихрей.

Новые теоретические гипотезы и положения относительно завихренных сдвиговых течений требуют экспериментальных проверок, кроме того, наиболее корректная верификация результатов численных моделирований предполагает их сопоставление с экспериментальными данными. Поэтому, несмотря на интенсивное развитие численных методов, основную роль в исследованиях потоков, которые имеют место внутри и вблизи обтекаемых углублений на поверхности, играет эксперимент. Ограниченность сведений по распределению завихренности в таких потоках, обуславливает необходимость получения новых научных результатов на основе физического моделирования структуры указанных течений.

Цель данной работы – исследование полей осреднённых и пульсационных величин завихренности внутри и вблизи поперечно обтекаемой полуцилиндрической траншеи на плоской стенке при различных режимах ее обтекания для выяснения механизмов генерации и взаимодействия с пограничным слоем квазиустойчивых вихревых структур, определяющих процессы переноса в турбулентных потоках, и, следовательно, гидроаэродинамические, теплопередающие и акустические характеристики поверхностей с углублениями.

#### Экспериментальная установка и методика исследования

Экспериментальные исследования поля завихренности внутри и вблизи поперечно обтекаемой траншеи или канавки на плоской поверхности проводились в аэродинамической трубе открытого типа. В исследованиях использовалась разработанная и изготовленная под руководством В. Н. Турика (доцента кафедры прикладной

гидроаэромеханики и механотроники НТУУ «КПИ») аэродинамическая труба, схема которой представлена на рис. 1. Атмосферное давление, температура и влажность воздуха, всасываемого вентилятором аэродинамической трубы из помещения лаборатории, контролировались в процессе исследований. Отклонения того или иного параметра учитывались поправочными коэффициентами при калибровках или поверках измерительных средств, а также при определении чувствительности первичных преобразователей и их амплитудно-частотных и фазовых характеристик. Рабочая часть аэродинамической трубы кругового сечения внутренним диаметром 0,102 м была изготовлена из прозрачного оргстекла и имела измерительный участок длиной около 0,7 м. Для обеспечения условий безотрывного обтекания и получения равномерного профиля скорости перед измерительным участком трубы устанавливался воздухозаборник длиной 0,4 м, входная часть которого была спрофилирована по закону лемнискаты Бернулли [11, 12] (рис. 2). Внутренние поверхности трубы не имели выступающих элементов и были гидравлически гладкими. Рабочая часть трубы подсоединялась к всасывающему патрубку центробежного вентилятора через промежуточный участок специальной конструкции с эластичной вставкой для предотвращения передачи возмущений от лопастей рабочего колеса вентилятора вверх по потоку. После монтажа аэродинамической трубы были проведены виброакустические измерения с целью выявления источников акустических и вибрационных помех, при обнаружении которых они устранялись. Для этого использовались активные (динамические) и пассивные

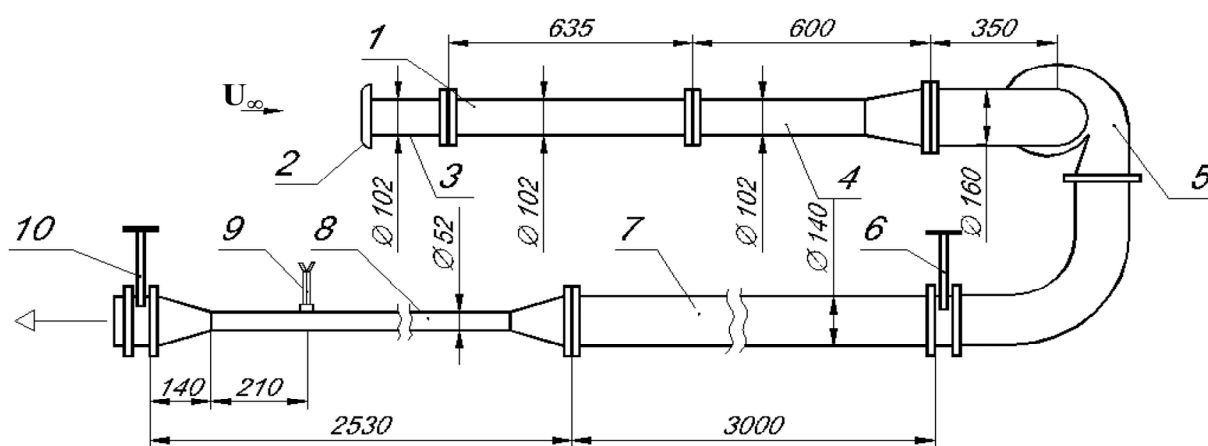


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (размеры даны в мм):

1 - рабочий участок; 2 - лемнистатный вход; 3 - входной участок; 4 - промежуточный участок демпфирования возмущений; 5 - центробежный вентилятор; 6, 10 - шибер; 7 - предвключенный трубопровод; 8 - расходомерный участок; 9 - пневмометрическая трубка

методы подавления акустических и вибрационных помех [13, 14]. Во время проведения исследований по изучению структуры поля течения над пластиной, а также внутри углубления применялись виброкселерометры для контроля вибрации измерительного стенда и средств измерений. Влияние вибрации на результаты измерений учитывалось при анализе экспериментальных данных.

В осевом сечении измерительного участка аэродинамической трубы (см. рис. 2), в ее горизонтальной

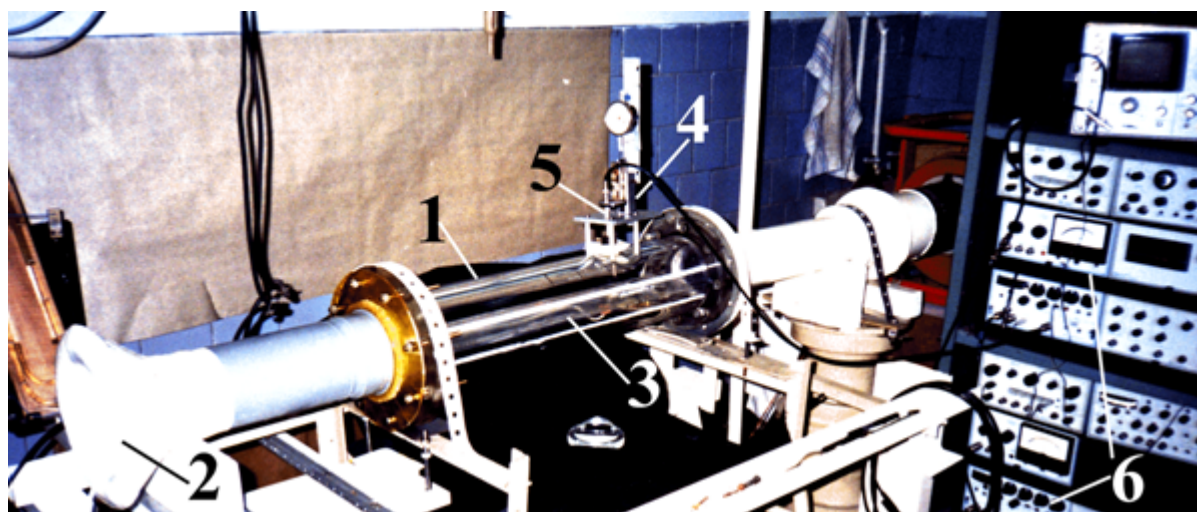


Рис. 2. Аэродинамическая труба: 1 - рабочий участок; 2 - воздухозаборник; 3 - пластина; 4 - координатное устройство; 5 - державка с датчиком; 6 - контрольно-измерительная аппаратура

плоскості, вдоль продольной оси монтировалась плоская, гидравлически гладкая пластина (высота шероховатости ее поверхности не превышала толщину вязкого подслоя). Пластина была сделана из листового оргстекла длиной 0,6 м, шириной 0,102 м и толщиной 0,004 м. Развитие пограничного слоя вдоль исследуемой пластины было естественным, т. е., без использования каких-либо искусственных турбулизаторов. На удалении 0,5 м от переднего края пластины была смонтирована поперечно обтекаемая полуцилиндрическая канавка длиной 0,08 м, диаметром  $2R=0,02$  м и глубиной 0,01 м. Схема расположения углубления и система координат представлены на рис. 3. В верхней части прозрачного измерительного участка аэродинамической трубы (см. рис. 2), в специальном люке без выступающих в поток или западающих элементов устанавливалось координатное устройство, которое позволяло перемещать соответствующие державки с проволочными датчиками термоанемометра типа 55R71 и 55R73 фирмы DISA Elektronik (Дания). Координатное устройство обеспечивало линейные перемещения датчиков с шагом  $10^{-5}$  м. Установка датчиков над исследуемой поверхностью, а также расположение измерительной пластины контролировалось при помощи лазерного луча. Луч через систему зеркал и расщепителей светового луча направлялся по трем координатным направлениям, где устанавливалось соответствующее устройство (пластина или датчик). Это позволило добиться точности установки этих устройств порядка  $10^{-5}$  м.

При исследовании поля скоростей в воздушном потоке использовались одноточечные проволочные датчики длиной  $l_0 = 1 \cdot 10^{-3}$  м и  $1,1 \cdot 10^{-3}$  м, диаметром  $d_0 = 5 \cdot 10^{-6}$  м. Величина их безразмерного удлинения  $l_0 / d_0 \geq 200$  соответствует рекомендациям работ [11, 15] для обеспечения равномерной теплоотдачи от проволочки, обтекаемой поперечным потоком, и уменьшения влияния на теплосъем токопроводящих и относительно массивных ножек державок датчиков. Материалом проволочек датчиков служили как платинированный вольфрам (90 % вольфрама и 10 % платины), так и вольфрам. Проволочки приваривались с помощью точечной сварки к торцам ножек державок.

Электрические сигналы от датчиков, соответствующие величинам осредненных и пульсационных скоростей (среднеквадратичных значений последних), поступали на комплект аппаратуры фирмы DISA

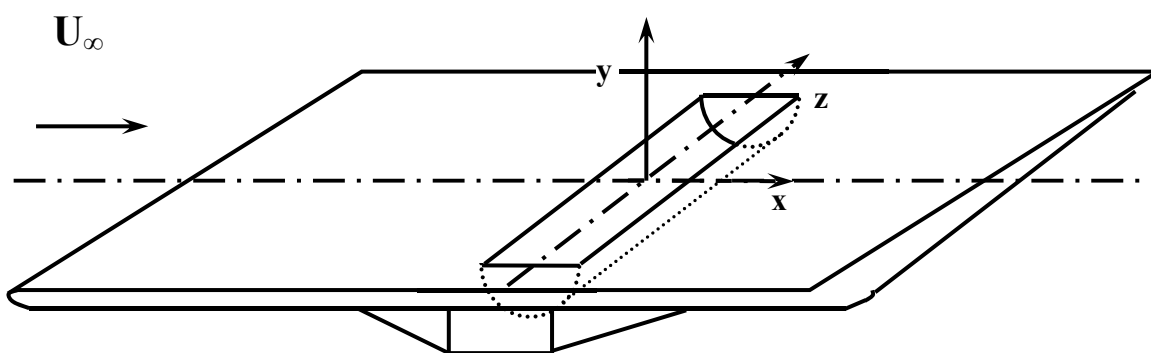


Рис. 3. Схема расположения полуцилиндрической траншеи на поверхности

Elektronik, обеспечивающей работу термоанемометра в режиме постоянной температуры. Показания заносились в протоколы испытаний для последующей обработки и анализа данных, а также вводились в компьютеры посредством аналогово-цифровых преобразователей. Параллельно этому электрические сигналы с выхода усилителя основного блока 55M01 и линейризатора 55M25 записывались на четырехканальном измерительном магнитофоне типа 7005 фирмы Brüel & Kjær. Кроме того, на магнитофоне регистрировались сигналы от виброакселерометров, которые были установлены на державках датчиков, на пластине, на стенках измерительного участка аэродинамической трубы. Сигналы виброакселерометров усиливались перед поступлением на магнитофон и, при необходимости, фильтровались.

Градуировка и калибровка термоанемометрических датчиков осуществлялась как абсолютным, так и относительным методами. Абсолютным методом – при помощи специальной калибровочной аэродинамической трубы типа 55D41 фирмы DISA Elektronik с возможностью регулирования скорости воздушного потока, а также на вращающемся стенде, позволяющем изменять как число оборотов диска, где монтировался калибруемый датчик скорости, так и радиус установки этого датчика на диске. Относительный метод основывался на сопоставлении измеряемых данных скорости калибруемым датчиком с показаниями эталонного измерителя скорости [12]. Для этого на этапе градуировки в верхний люк измерительного участка аэродинамической трубы, предназначенный для установки координатного устройства, вставлялось спрофилированное по внутренней цилиндрической поверхности участка приспособление, обеспечивающее обтекание набегающим потоком воздуха параллельно расположенных проволочного датчика и образцовой миниатюрной трубки Пито-Прандтля. По перепадам давления, регистрируемым спиртовым микроанемометром, соединенным с пневмометрической трубкой, и показаниям вольтметров термоанемометра строились

калибровочные кривые. По ним известные методики [11, 15] позволили определить осредненную по времени скорость и среднеквадратичное значение пульсации скорости набегающего на датчик потока.

Экспериментальные исследования в аэродинамической трубе проводились при средних скоростях потока от 1,0 м/с до 20 м/с (число Маха  $M \ll 1$ ), которым соответствовали числа Рейнольдса  $Re_L = 3,7 \cdot 10^4 \div 6,7 \cdot 10^5$ , определенные по скорости невозмущенного потока и расстоянию от передней кромки пластины до начала углубления, и числа Рейнольдса  $Re_d = 1,48 \cdot 10^3 \div 2,68 \cdot 10^4$ , определенные по диаметру углубления.

В работе удалось достичь приемлемых условий проведения экспериментальных исследований с достаточно высокой степенью точности и повторяемости результатов, позволяющих проводить статистический анализ полученных данных, которые регистрировались в течение одного замера не менее минуты. В аэродинамической трубе степень турбулентности набегающего потока в месте проведения исследований на пластине не превышала (3...4) %. Уровни акустического излучения в районе углубления составляют не более 90 дБ относительно  $2 \cdot 10^{-5}$  Па в диапазоне частот от 20 Гц до 20000 Гц, а уровни вибрации исследуемой пластины не превышали: -60 дБ относительно ускорения свободного падения  $g$  в продольном направлении оси  $x$ ; -55 дБ – в направлении  $y$  и -57 дБ в направлении  $z$ . Уровни вибраций самого измерительного участка аэродинамической трубы, а также координатных устройств не превышали -55 дБ относительно  $g$ . Все уровни вибраций измерялись в частотном диапазоне от 2 Гц до 12,5 кГц. Погрешность измерений осредненных и пульсационных величин не превышала 10 % (надежность 95 % или  $2\sigma$ ).

### Результаты исследований

Распределение поперечной составляющей осреднённой завихренности  $\Omega_z = \partial V / \partial x - \partial U / \partial y$ , нормированной диаметром полуцилиндрического углубления и скоростью набегающего потока, в структуре вихревого течения показано на рис. 4: а – для  $U_\infty = 1,11$  м/с, б – для  $U_\infty = 10,1$  м/с, в – для  $U_\infty = 20,1$  м/с. Зависимость величины  $\Omega_z$  оценивалась по доминирующей, как ранее указывалось, составляющей  $\partial U / \partial y$ , и на этом рисунке показана в виде изолиний  $(2R\Omega_z / U) \cdot 100\%$  по срединному сечению исследуемой пластины и углубления. Сплошными линиями изображены отрицательные значения осреднённой завихренности  $\Omega_z$ , а пунктирными линиями – её положительные значения. Как следует из представленных кривых, в пограничном слое над пластиной и в слое смещения над углублением значительно преобладают отрицательные величины осреднённой завихренности. На нижней границе слоя смещения (область взаимодействия с циркуляционным течением) завихренность меняет свой знак на противоположный. В придонной части углубления появляются обширные области отрицательных значений  $\Omega_z$ , особенно с увеличением скорости обтекания. Как и следовало ожидать, в соответствии с определением Лайтхилла, основными источниками или стоками завихренности здесь являются обтекаемые поверхности, как пластины, так и самого углубления, т. е., твердая граница. Наряду с этим, высокие уровни осреднённой завихренности регистрируются в крайних критических углах углубления, особенно в районе передней (срывной) кромки углубления. С ростом скорости обтекания завихренность в этих узловых точках растёт. Причём, если при малой скорости  $U_\infty$  области максимальных значений модуля  $\Omega_z$  несколько приподняты над обтекаемой поверхностью вглубь пограничного слоя, как в отрывной области, так и в зоне взаимодействия вихревых структур слоя смещения с поверхностью кормовой стенки канавки, то с увеличением  $U_\infty$  эти области располагаются ниже передней и задней кромок углубления.

При  $U_\infty = 20,1$  м/с максимум модуля  $\Omega_z$  смещается в пограничный слой над поверхностью пластины за задней кромкой, в то время как под ней, начиная от кормовой стенки канавки и далее, в обратном направлении, к передней её стенке, проявляется доминирование завихренности противоположного знака, за исключением «островков» интенсивной завихренности прежнего знака непосредственно в придонной части траншеи, также смещённых ближе к её передней стенке.

С ростом скорости обтекания число областей с повышенными уровнями завихренности также растёт, особенно внутри углубления, указывая на увеличение числа квазиустойчивых мелкомасштабных вихревых систем в структуре потока внутри полуцилиндрической канавки.

Минимальные уровни поперечной завихренности (по абсолютному значению) наблюдаются в тех областях вихревого течения внутри траншеи, где располагаются ядра квазиустойчивых крупномасштабных вихревых структур, которые указаны, например, в работах [16, 17].

На рис. 5 показано распределение среднеквадратичных величин пульсационной составляющей поперечной завихренности, условно обозначенной, как  $\overline{\omega'_z} \equiv \sqrt{\overline{\omega'_z{}^2}}$  и определенной аналогично осреднённой завихренности, нормированной теми же переменными для трех скоростей обтекания (позиции а–в).

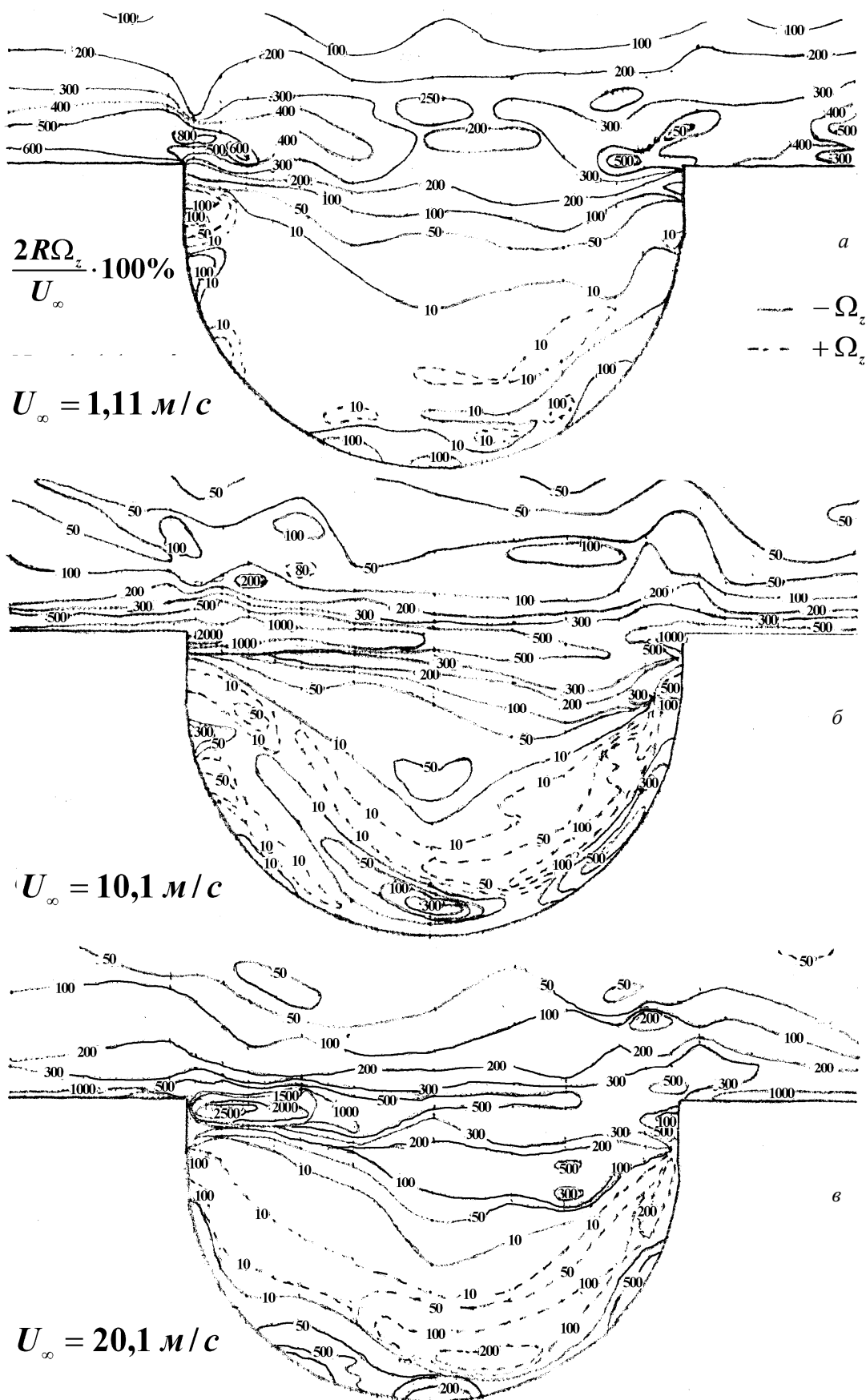


Рис. 4. Изолинии средних значений завихренности на пластине с полуцилиндрическим углублением

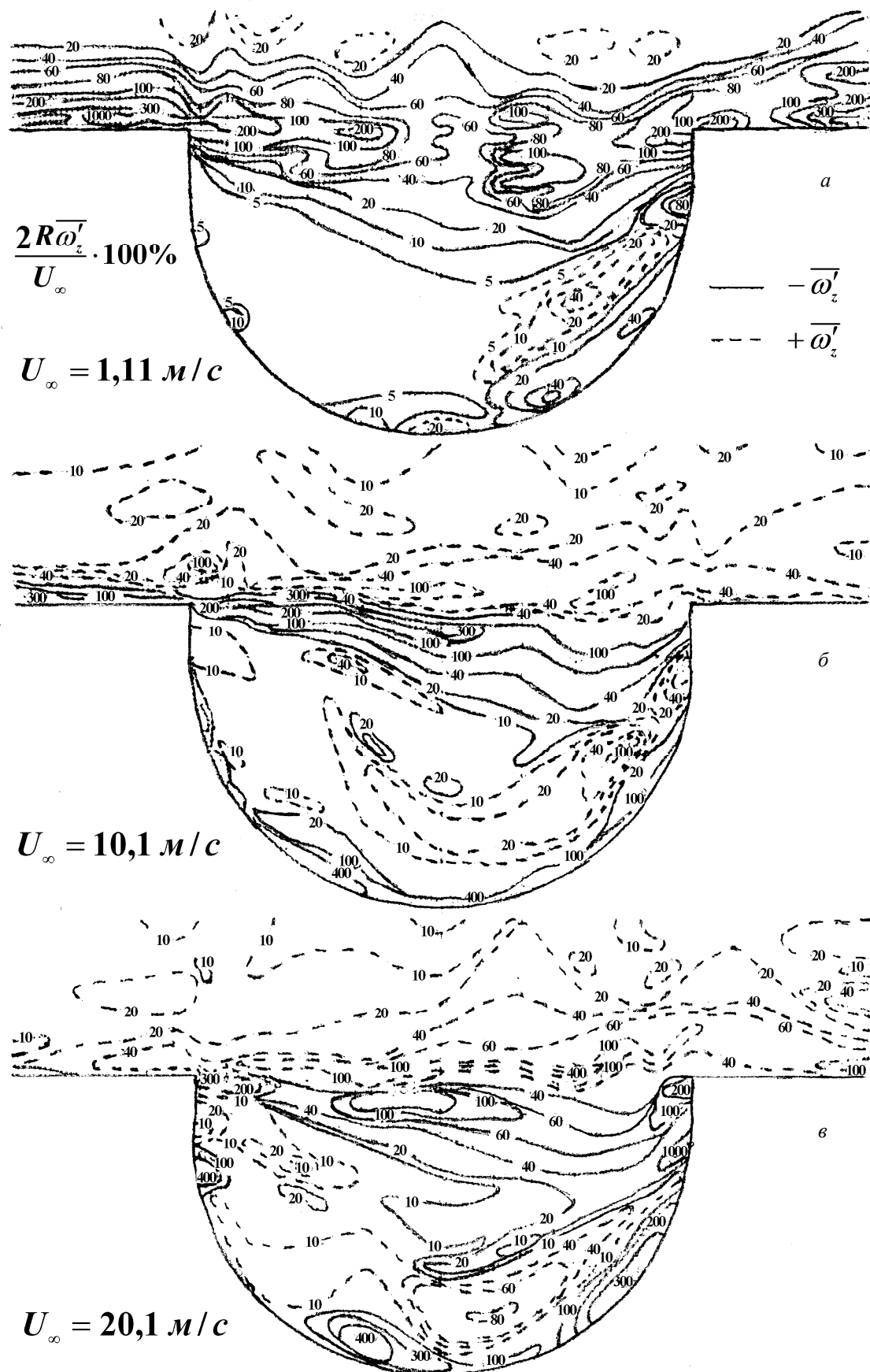


Рис. 5. Изолинии пульсационных составляющих завихренности на пластине с поперечно обтекаемой полуцилиндрической канавкой



Также, как и на рис. 4, сплошная линия на рис. 5 отображает отрицательные значения пульсаций завихренности, а пунктирная линия – положительные значения  $\overline{\omega'_z}$  в процентном отношении, т. е. в виде  $(2R\overline{\omega'_z}/U) \cdot 100\%$ . Как следует из представленных зависимостей, с ростом скорости обтекания  $U_\infty$  в пограничном слое над пластиной, над траншеей и вблизи задней стороны поверхности углубления всё более доминируют пульсации завихренности положительных значений как по величине, так и по занятому вихревыми структурами объёму. С приближением к обтекаемой поверхности, а также в сдвиговом слое смещения пульсации завихренности меняют свой знак, увеличиваясь по модулю. Это обусловлено тем, что максимальные уровни пульсационной энергии в пограничном слое, как известно [18–20], имеют место на высоте  $y^+ \approx (12 \dots 15)$  от стенки и убывают при приближении к внешней границе пограничного слоя, таким образом, меняя знак завихренности вблизи этих значений ординаты пограничного слоя. Как показано на рис. 5, в нижней части слоя смещения (внутри углубления) преобладают отрицательные значения пульсационной завихренности. В самом углублении характер поведения поля пульсаций завихренности в чём-то подобен поведению осреднённой поперечной завихренности (см. рис. 4). Зоны повышенных уровней пульсаций находятся, главным образом, между областями максимумов осреднённой завихренности, что следует из сопоставления данных рис. 5 и рис. 4. При этом максимальные значения пульсаций завихренности наблюдаются в области взаимодействия вихревых структур слоя смещения с квазистойчивым крупномасштабным вихрем, который генерируется внутри поперечно обтекаемой полуцилиндрической траншеи. С ростом скорости обтекания абсолютные значения пульсаций поперечной завихренности изменяются незначительно, хотя в области взаимодействия набегающего потока с кормовой стенкой они растут при увеличении скорости  $U_\infty$ . Кроме того, при переходе от ламинарного режима обтекания полуцилиндрической канавки (рис. 5а) к турбулентному (рис. 5б, в) в передней части углубления за областью отрыва пограничного слоя локальные зоны максимальных пульсаций завихренности приближаются к передней кромке углубления, всё более испытывая влияние обратного по отношению к основному направлению потока квазистойчивого крупномасштабного вихря, сформированного в результате ударного взаимодействия слоя смещения с кормовой частью углубления.

Полученные картины распределения осреднённых и пульсационных величин завихренности находятся в соответствии с изученными ранее профилями продольных составляющих осреднённых и пульсационных скоростей [16, 17] и в совокупности с ними дают более полное представление о механизме формирования когерентных вихревых структур в полуцилиндрическом углублении.

### Выводы

Экспериментальные исследования поля завихренности внутри и вблизи поперечно обтекаемой полуцилиндрической канавки на гидравлически гладкой плоской пластине показали:

1. Основными источниками или стоками завихренности являются обтекаемые поверхности, как пластины, так и самого углубления, т. е., твердая граница.
2. Обнаружено, что высокие уровни осреднённой завихренности регистрируются в крайних критических углах углубления – там, где происходит отрыв пограничного слоя и формируется слой смещения, а также там, где вихревые структуры слоя смещения взаимодействуют с кормовой стенкой полуцилиндрической траншеи. С ростом скорости обтекания завихренность в этих узловых точках растёт, несколько перераспределяясь вглубь кормовой стенки.
3. Результаты исследований показали, что с увеличением скорости течения внутри полуцилиндрической канавки увеличивается число областей с повышенной интенсивностью поперечной завихренности и эти области обусловлены действием мелкомасштабных вихревых структур, число которых с ростом скорости увеличивается.
4. Установлено, что зоны повышенных уровней пульсаций завихренности находятся, главным образом, между областями максимумов средней завихренности и в области взаимодействия вихревых структур слоя смещения с квазистойчивым крупномасштабным вихрем, генерируемым внутри поперечно обтекаемой полуцилиндрической траншеи в результате ударного взаимодействия слоя смещения с кормовой частью углубления.
5. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования поведения сред в углублениях, определяющего процессы переноса и гидроаэродинамическое сопротивление при обтекании поверхностей теплообменных, летательных, подводных и надводных аппаратов, элементов вихрегенераторов для управления пограничным слоем и других объектов.

**Анотація.** Розглянуті особливості формування поля завихреності усередині та поблизу поперечно обтічної напівциліндричної траншеї на гідравлічно гладкій пласкій поверхні. Наведено результати експериментальних досліджень усереднених і пульсаційних складових поперечної завихреності, які отримано для різних режимів течії у аеродинамічній трубі. Дослідження проводилися із застосуванням дротяного термоанемометра. Знайдено, що найбільші рівні осередненої



завихреності спостерігаються поблизу обтічних поверхонь і в кутових областях траншеї – там, де відбувається відрив прилежового шару та взаємодія вихрових структур шару змішування з квазістійким великомасштабним вихором і, особливо, поблизу кормової стінки.

**Ключові слова:** усереднена та пульсаційна завихреність, напівциліндрична траншея, дротяний термоанемометр, когерентні вихрові структури, прилежовий шар

**Abstract.** The article are devoted to elucidation of current macro- and microstructure inside of semi-cylindrical trench and near its in boundary layer on flat plate by means of investigation of vorticity distributions. Vorticity defines rotational components and physics of any liquid and gas motion, but in turbulent flows on working surfaces with geometric large-scale irregularities by indentations type and in currents with coherent vortical structures the vorticity takes the most important part in processes of mass, momentum and energy transfer. For better understanding of mechanism of indicated phenomenon this paper offers some new scientific results on experimental research of vorticity and its fluctuations fields in the region of the cross-streamlined semi-cylindrical trench on a flat surface for different flow regimes according to Reynolds numbers range (by trench diameter)  $Re_d = 1,48 \cdot 10^3 \div 2,68 \cdot 10^4$ . The experimental investigation was carried out on open-circuit wind tunnel equipped by constant temperature anemometer with hot-wire probes, laser instrumentation, vibration and acoustic analyzer. The measurements of local time-averaged velocities and velocity fluctuations discovered that the most levels of mean vorticity take place near by the streamlined surfaces and in the angular areas of trench where boundary layer is separated and vortex structures of the shear blending layer are interacted with back wall of the trench. Zones of increased vorticity fluctuation levels are disposed mainly between maximum mean vorticity regions and in area formed by interaction of coherent vortical structures of shear blending layer with quasi-stable large-scale eddy generated owing to impact interaction of blending layer with trench back wall. Results of investigation may be used for efficiency estimations of transfer processes on streamlined elements of heat exchangers, engines, ships, aircrafts etc.

**Keywords:** mean vorticity, vorticity fluctuations, semi-cylindrical trench, hot-wire anemometer, coherent vortical structures, boundary layer

#### Библиографический список использованной литературы

1. Khalatov A.A. Heat transfer and fluid mechanics over surface indentations (dimples) / A.A. Khalatov. – K.: National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics, 2005. – 64 p.
2. Comte P. Large- and small-scale stirring of vorticity and a passive scalar in a 3-D temporal mixing layer / P. Comte, M. Lesieur, E. Lamballais // Phys. Fluids. – 1992. – Vol. 4, No. 12. – P. 2761–2778.
3. Rogers M.M. The structure of the vorticity field in homogeneous turbulent flows / M.M. Rogers, P. Moin // J. Fluid Mech. – 1987. – Vol. 176. – P. 33–66.
4. Shah D.A. Isotropic forms of vorticity and velocity structure function equations in several turbulent shear flows / D.A. Shah, R.A. Antonia // Phys. Fluids.- 1986.- Vol. 29, № 12. – P. 4016 – 4024.
5. Lighthill M.J. Introduction. Boundary layer theory / M.J. Lighthill // In Laminar boundary layers. Ed. L. Rosenhead. – Oxford: Oxford University Press, 1963. – P. 46–113.
6. Andreopoulos J. Wall-vorticity flux dynamics in a two-dimensional turbulent boundary layer / J. Andreopoulos, J.H. Agui // J. Fluid Mech. – 1996. – Vol. 309. – P. 45–84.
7. Moin P. The structure of the vorticity field in turbulent region flows. Part 1: Analysis of instantaneous fields and statistical correlations / P. Moin, J. Kim // J. Fluid Mech. – 1985. – Vol. 155. – P. 441–464.
8. Shafi H.S. Intermittency of vorticity in a turbulent shear flow / H.S. Shafi, Y. Zhu, R.A. Antonia // Phys. Fluids. – 1996. – Vol. 8, No. 8. – P. 2245–2247.
9. Rajagopalan S. Structure of the velocity field associated with the spanwise vorticity in the wall region of a turbulent boundary layer / S. Rajagopalan, R.A. Antonia // Phys. Fluids. – 1993. – Vol. 5, No. 10. – P. 2502–2510.
10. Klewicki J.C. On the sign of the instantaneous spanwise vorticity component in the near-wall region of turbulent boundary layers / J.C. Klewicki, C.P. Gendrich, J.F. Foss, R.E. Falco // Phys. Fluids. – 1990. – Vol. 2, No. 6. – P. 1497–1503.
11. Дыбан Е.П. Теплообмен и гидродинамика турбулизированных потоков / Е.П. Дыбан, Э.Я. Эпик. – К.: Наукова думка, 1985. – 296 с.
12. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И.Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1974. – 480 с.
13. Балицкий Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Иванова, Е.В. Соколова, Е.И. Хомяков. – М.: Наука, 1984. – 120 с.
14. Ивович В.А. Защита от вибраций в машиностроении / В.А. Ивович, В.Я. Онищенко. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
15. Алемасов В.Е. Термоанемометрические методы исследования отрывных течений / В.Е. Алемасов, Г.А. Глебов, А.П. Козлов. – Казань: Казанский филиал АН СССР, 1990. – 178 с.
16. Турик В.М. Швидкості у прилежовому шарі над пластиною з напівциліндричним заглибленням / В.М. Турик, В.В. Бабенко, В.А. Воскобійник, А.В. Воскобійник // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2008. – № 4. – С. 46–54.
17. Турик В.М. Кінематичні особливості прилежового шару поблизу напівциліндричної каверни на пластині / В.М. Турик, В.В. Бабенко, В.А. Воскобійник, А.В. Воскобійник // Вісник НТУУ „КПІ”. – Машинобудування. – 2010. – Вип. 59. – С. 110–117.
18. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение: Пер. с англ. / П. Брэдшоу. – М.: Мир, 1974. – 278 с.
19. Cantwell B.J. Organized motion in turbulent flow / B.J. Cantwell // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1981. – Vol. 13. – P. 457–515.
20. Neves J.C. Effects of convex transverse curvature on wall-bounded turbulence. Part 1. The velocity and vorticity / J.C. Neves, P. Moin, R.D. Moser // J. Fluid Mech. – 1994. – Vol. 272. – P. 349–381.

**References**

1. *Khalatov A.A.*, Heat transfer and fluid mechanics over surface indentations (dimples). A.A. Khalatov. Kyiv: National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics, 2005. 64 p.
2. *Comte P.*, *Lesieur M.*, *Lamballais E.*, Physics of Fluids, 1992, Vol. 4, No. 12, pp. 2761–2778.
3. *Rogers M.M.*, *Moin P.*, Journal of Fluid Mechanics, 1987, Vol. 176, pp. 33–66.
4. *Shah D.A.*, *Antonia R.A.*, Physics of Fluids, 1986, Vol. 29, No. 12, pp. 4016 – 4024.
5. *Lighthill M.J.*, Introduction. Boundary layer theory. M.J. Lighthill. In Laminar boundary layers. Ed. L. Rosenhead. Oxford: Oxford University Press, 1963. P. 46–113.
6. *Andreopoulos J.*, *Agui J.H.*, Journal of Fluid Mechanics, 1996, Vol. 309, pp. 45–84.
7. *Moin P.*, *Kim J.*, Journal of Fluid Mechanics, 1985, Vol. 155, pp. 441–464.
8. *Shafi H.S.*, *Zhu Y.*, *Antonia R.A.*, Physics of Fluids, 1996, Vol. 8, No. 8, pp. 2245–2247.
9. *Rajagopalan S.*, *Antonia R.A.*, Physics of Fluids, 1993, Vol. 5, No. 10, pp. 2502–2510.
10. *Klewicki J.C.*, *Gendrich C.P.*, *Foss J.F.*, *Falco R.E.*, Physics of Fluids, 1990, Vol. 2, No. 6, pp. 1497–1503.
11. *Dyban E.P.*, *Epik E.Ya.*, *Teplomassoobmen i gidrodynamika turbulizirovannyh potokov* (Heat and mass transfer and hydrodynamics of turbulent flows), Kyiv: Naukova dumka, 1985, 296 p.
12. *Povh I.L.*, *Aerodinamicheskij eksperiment v mashinostroenii* (Aerodynamic experiment in mechanical engineering), Leningrad: Mashinostroenije, 1974, 480 p.
13. *Balitskij F.Ya.*, *Ivanova M.A.*, *Sokolova E.V.*, *Khomjakov E.I.*, *Vibroakusticheskaja diagnostika zarozhdajuschih defektov* (Vibration-acoustic diagnosis of incipient defects), Moscow: Nauka, 1984. 120 p.
14. *Ivovich V.A.*, *Onischenko V.Ya.*, *Zaschita ot vibratsij v mashinostroenii* (Protection against vibrations in engineering industry), Moscow: Mashinostroenije, 1990, 272 p.
15. *Alemasov V.E.*, *Glebov G.A.*, *Kozlov A.P.*, *Termoanemometricheskije metody issledovanija otryvnyh techenij* (Thermoanemometrical methods of stalled flows study), Kazan: Kazanskij filial AN SSSR, 1990, 178 p.
16. *Turick V.M.*, *Babenko V.V.*, *Voskoboinick V.A.*, *Voskoboinick A.V.*, Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Politechnic Institute”, 2008, No. 4, pp. 46–54.
17. *Turick V.M.*, *Babenko V.V.*, *Voskoboinick V.A.*, *Voskoboinick A.V.*, Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Politechnic Institute”, 2010, No. 59, pp. 110–117.
18. *Bradshaw P.* *Vvedenie v turbulentnost i ee izmerenie* (An Introduction to Turbulence and its Measurement), Per. s engl. Moscow: Mir, 1974, 278 p.
19. *Cantwell B.J.*, Annual Review of Fluid Mechanics, 1981, Vol. 13, pp. 457–515.
20. *Neves J.C.*, *Moin P.*, *Moser R.D.* Journal of Fluid Mechanics, 1994, Vol. 272, pp. 349–381.

Подана до редакції 04.08.2015