

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГІДРОДИНАМІКІВ
КРИВОЛІНІЙНИХ КАНАЛАХ КОНФУЗОРНОГО ТИПУ**

В. Г. Горобець, доктор технічних наук, доцент

М. Ю. Масюк, аспірант*

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: gorobetsv@ukr.net

Анотація. *Прямолінійні і криволінійні канали конфузорового типу можуть бути використані при розробці теплообмінного і турбінного обладнання, нових типів вітрогенераторів, тощо. При їх дослідженні вирішується завдання вибору такої геометрії каналу, яка забезпечує мінімальні втрати тиску.*

Розглядається конструкція каналу конфузорового типу, який має криволінійні стінки. При такій конструкції каналу повітря входить у вхідний отвір, проходить криволінійним каналом, який звужується, причому відповідно до закону Бернуллі швидкість повітря у вихідному отворі буде зростати. Такі канали можуть бути використані для підвищення швидкості вітрового потоку у вітрогенераторах, що дає змогу збільшити швидкість обертання ротора вітрогенератора і підвищити ефективність його роботи. Криволінійні стінки каналу вибираються так, щоб мінімізувати наявність відривних зон в каналах і зменшити в них аеродинамічні втрати.

Проведено математичне моделювання процесів переносу маси повітря в криволінійному каналі конфузорового типу використовуючи рівняння Нав'є-Стокса в двовимірній постановці при ламінарному режимі течії, який характерний для руху повітряних потоків в каналах подібного типу.

Чисельне моделювання гідродинамічних процесів в криволінійному каналі конфузорового типу проводилось з використанням програмного продукту САПР ANSYS Fluent 18.2. Встановлено, що максимальні значення швидкості спостерігаються в кінцевій частині каналу. Біля поверхні одної із стінок присутня застійна зона, в якій повітря рухається з дуже малою швидкістю, що обумовлено перпендикулярним напрямком руху повітря до вхідного отвору.

Має місце падіння тиску на виході з каналу. Разом з тим, в кількісному значенні величина цього падіння несуттєва, що обумовлено наявністю кривизни каналу для потоку повітря в каналі.

Наявність криволінійності стінок каналу призводить до відсутності відривних зон повітря, що обумовлює невеликі втрати тиску в каналах порівняно з каналами інших конфігурацій. Це покращує аеродинамічні і енергетичні характеристики вітрогенераторів.

Ключові слова: *криволінійний канал, конфузор, тиск, швидкість, ламінарний потік*

Актуальність. Прямолінійні і криволінійні канали конфузорного типу знайшли широке застосування в різних областях науки і техніки. Такі канали можуть бути використані при розробці теплообмінного і турбінного обладнання, нових типів вітрогенераторів, тощо [1-5]. Однією із важливих задач, які необхідно вирішити при проведенні досліджень каналів конфузорного типу, є вибір такої геометрії каналу, яка забезпечує мінімальні втрати тиску, наприклад, при проходженні газових або повітряних потоків.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Широкого поширення при проведенні таких досліджень набув обчислювальний експеримент, що став одним з найважливіших інструментів при вивченні задач гідродинаміки та тепло- і масопереносу. Інформація, отримана за допомогою чисельного моделювання, дозволяє отримати локальні розподіли швидкостей, тисків, температур та інших параметрів, що характеризують даний процес. Варіюючи геометрію форми каналу можна досягти мінімальних втрат тиску, що важливо, наприклад, при розробці повітряних каналів для вітрогенераторів нового типу.

Нині для проведення розрахунків в області обчислювальної гідродинаміки, тепло- і масопереносу, міцності та інших областей техніки широкого поширення набули інженерні обчислювальні пакети. Серед них важливе місце займає програмний пакет FLUENT, який призначений для моделювання складних течій рідин і газів в широкому діапазоні зміни теплофізичних властивостей з використанням багатосіткових методів, що мають поліпшену збіжність обчислювальних процесів.

Мета дослідження – проведення дослідження гідродинамічних процесів в криволінійних каналах конфузорного типу для зменшення гідравлічних втрат.

Матеріали і методи дослідження. Розглядається конструкція каналу конфузорного типу, який має криволінійні стінки. За такої конструкції каналу повітря входить у вхідний отвір, проходить криволінійним каналом, який

звужується, причому відповідно до закону Бернуллі швидкість повітря у вихідному отворі буде зростати. Такі канали можуть бути використані для підвищення швидкості вітрового потоку у вітрогенераторах, що дає змогу збільшити швидкість обертання ротора вітрогенератора і підвищити ефективність його роботи. Криволінійні стінки каналу вибираються таким чином, щоб мінімізувати наявність відривних зон в каналах і зменшити в них аеродинамічні втрати. На рис. 1 показана схема криволінійного каналу конфузорового типу.

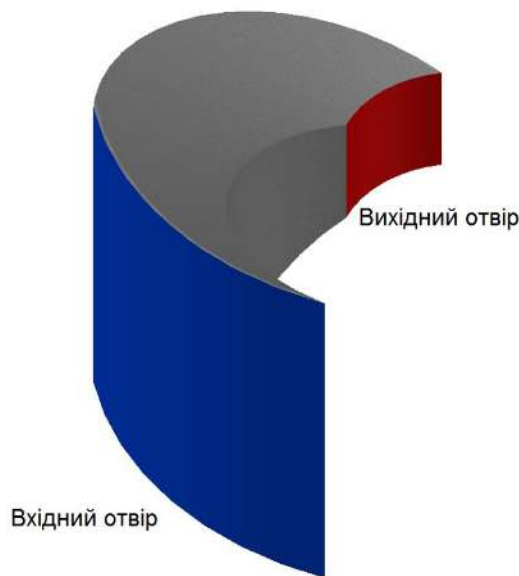


Рис. 1. Криволінійний канал конфузорового типу

Проведено математичне моделювання процесів переносу маси повітря в криволінійному каналі конфузорового типу використовуючи рівняння Нав'є-Стокса в двовимірній постановці при ламінарному режимі течії, який характерний для руху повітряних потоків в каналах подібного типу:

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \end{aligned} \right\}$$
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$
$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right).$$

На стінках каналу та на його вході і виході виконуються такі крайові умови:

$$u(t=0) = v(t=0) = 0; T_{cm}(x = x_{i,cm}, y = y_{i,cm}) = T_0 \equiv const,$$

$$\text{при } x = x_{i,cm}, y = y_{i,cm}; W = 0, \frac{\partial W}{\partial \bar{n}} = 0,$$

$$\text{при } x = x_{ex}; y = y_{ex}; T = T_0, W = W_0;$$

$$\text{при } x = x_{вих}; y = y_{вих}; \frac{\partial W}{\partial x} = 0.$$

Для наведеної моделі прийнято такі позначення: x, y – декартові координати; t – час; u, v – компоненти швидкості; ρ, λ, C_p – густина, коефіцієнт теплопровідності і питома теплоємність повітря відповідно; \bar{n} – вектор нормалі на стінці каналу; індекси $i=1,2$ і cm позначають стінки каналу; $ex, вих$ – вхід і вихід з каналу; W – швидкість повітря на поверхні стінок і на вході та виході з каналу.

Чисельне моделювання гідродинамічних процесів в криволінійному каналі конфузорного типу проводилось використовуючи програмний продукт САПР ANSYS Fluent 18.2. Побудовано розрахункову сітку в каналі, яка має подрібнення поблизу стінок. Елемент такої сітки представлено на рис. 2.

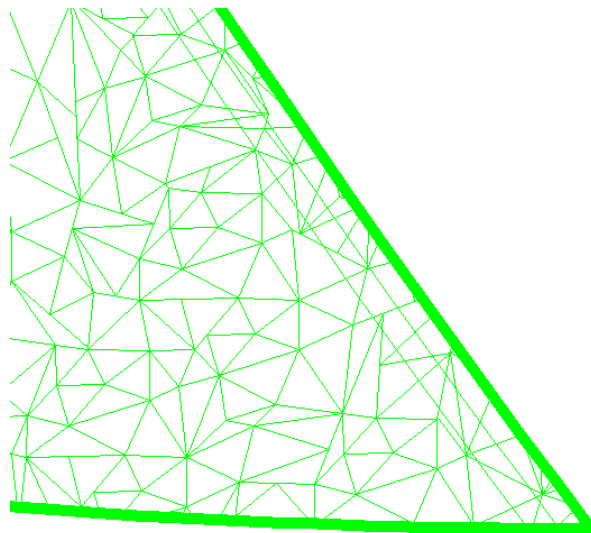


Рис. 2. Елемент розрахункової сітки в каналі

Як носій, який протікає в каналі, вибрано повітря зі швидкістю $W_0=2$ м/с на вході в канал.

Результати досліджень та їх обговорення. Був проведений чисельний розрахунок динамічних характеристик носія в досліджуваному каналі, який представлений на рис. 3, 4.

На рис. 3 представлено розподіли поля швидкостей в каналі. Як впливає з отриманих розподілів, максимальні значення швидкості спостерігаються в кінцевій частині каналу. Біля поверхні одної із стінок присутня застійна зона, в якій повітря рухається з дуже малою швидкістю, що обумовлено перпендикулярним напрямком руху повітря до вхідного отвору.

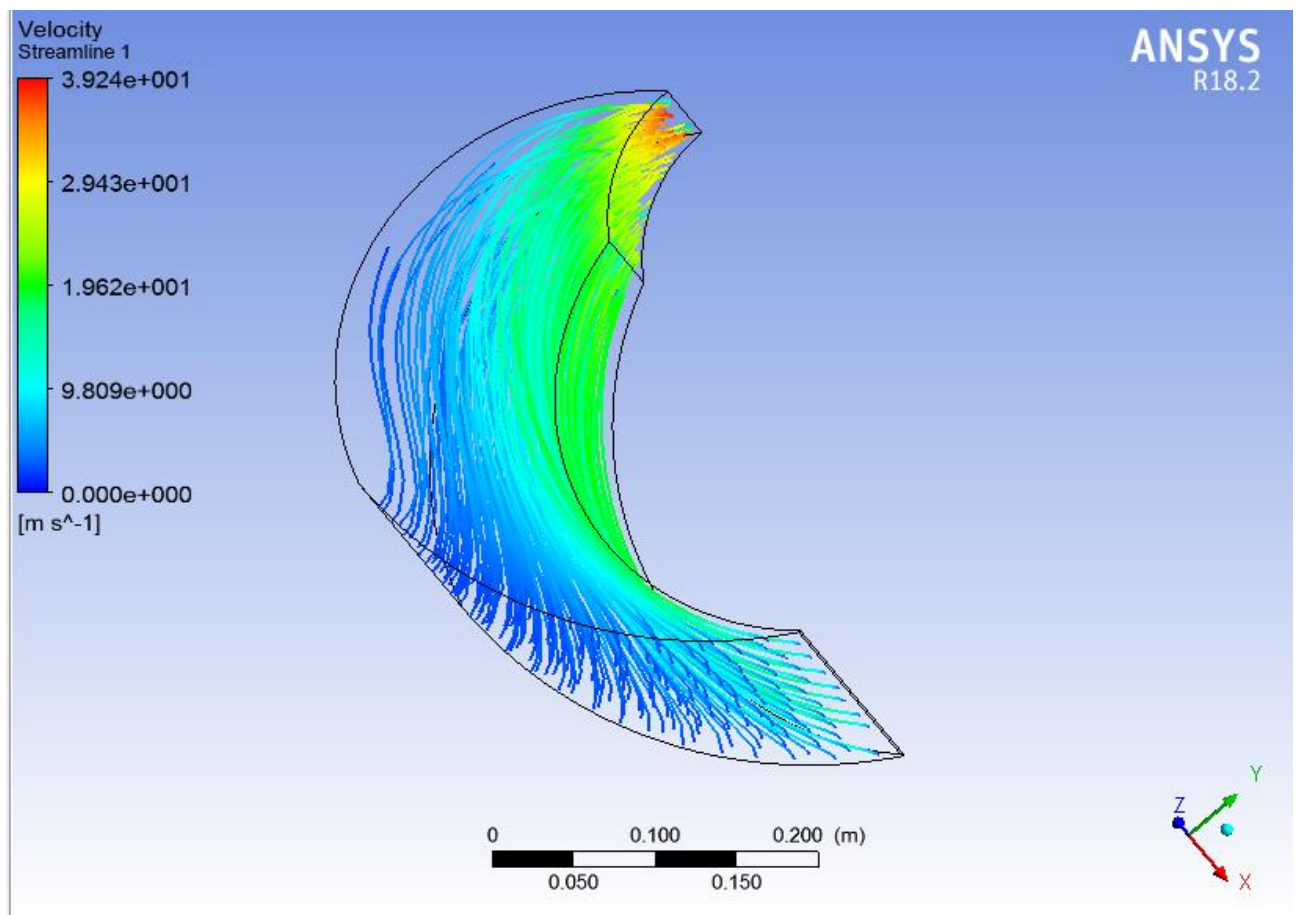


Рис. 3. Розподіл поля швидкостей в каналі

У результаті чисельних розрахунків отримано розподіли локальних тисків в каналі, які наведені на рис. 4. Як витікає з рисунка, має місце падіння тиску на

виході з каналу. Разом з тим, в кількісному значенні величина цього падіння несуттєва, що обумовлено наявністю кривизни каналу для потоку повітря в каналі.

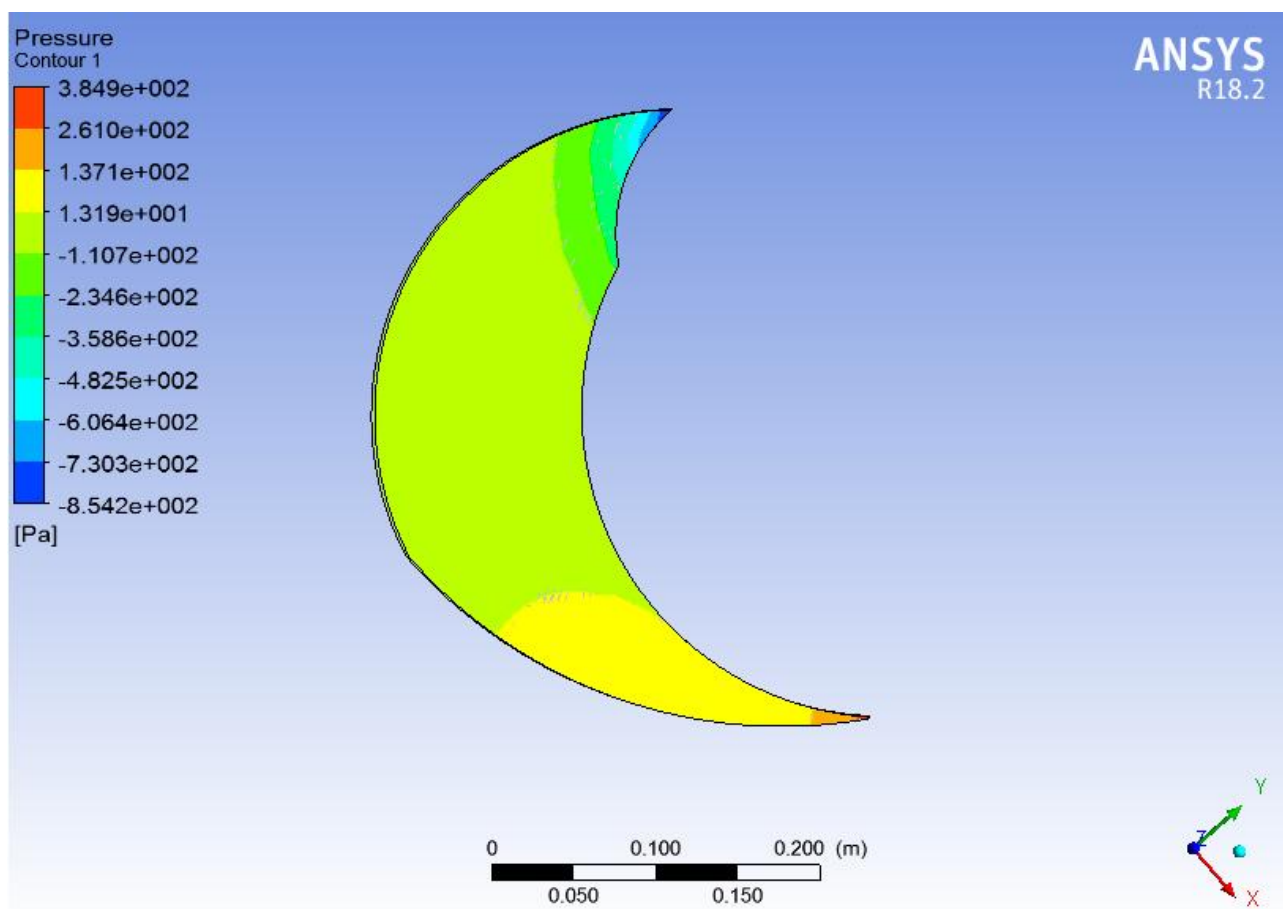


Рис. 4. Розподіл тиску в каналі

Аналіз отриманих розподілів швидкостей повітря і тиску в каналі конфузорового типу показує, що наявність криволінійності стінок каналу призводить до відсутності відривних зон повітря, що обумовлює невеликі втрати тиску в каналах порівняно з каналами інших конфігурацій. Канали такого типу можуть використовуватись у вітрогенераторах, що покращить їх аеродинамічні характеристики, а також ефективність використання вітрової енергії.

Висновки і перспективи. Проведено чисельне моделювання процесів гідродинаміки в криволінійному каналі конфузорового типу за допомогою програмного пакета САПР ANSYS Fluent 18.2.

1. Отримано локальні розподіли поля швидкостей та тисків. Показано, що використання криволінійних каналів зменшує наявність відривних зон, знижує втрати тиску, що покращує аеродинамічні і енергетичні характеристики вітрогенераторів.

Список літератури

1. Калинин Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах. / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – М.: Машиностроение, 1990. – 246 с.
2. Бубенчиков А. А. Применение ветроэнергетических установок с концентраторами ветровой энергии в регионах с малой ветровой нагрузкой /А. А. Бубенчиков, Е. Ю. Артамонова, Р. А. Дайчман и др. // – Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 5–2 (36). – С.31–35.
3. Thangam S. Laminar secondary flow in curved rectangular ducts. / S.Thangam,N. J. And Hur//Fluid Mechanics. – 1990. – 217.– P. 421–440.
4. [Волков К. Н.](#) Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях. / К. Н. [Волков](#), В. Н. [Емельянов](#). – М.: Физматгиз, 2010. – 357 с.
5. [Волков К. Н.](#) Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок / К. Н. [Волков](#), В. Н. [Емельянов](#). – М.: Физматгиз, 2011. – 396 с.

References

1. Kalinin, E. K., Dreitser, G. A., Yarkho, S. A. (1990). Intensificatsiyat eploobmena v kanalah [Intensification of heat transfer in the channels] Moskow: Mashinostroyeniye, 246.
2. Bubenchikov, A. A., Artamonov, E. Yu., Daychman, R. A., Fayfer, L. A., Katerov, F. V., Bubenchikova, A. A. (2015). Primeneniye vetroenergetisheskih ustanovok s kontsentratorami vetrovoy energii v regionah s maloy vetroviy nagruzkooy [Application of wind power plants with wind energy concentrators in regions with low wind load]. Mezhdunarodniy naushno-issledovatelskiy zhurnal, 5–2 (36), 31–35.
3. Thangam, S., And Hur, N. J. (1990). Laminar secondary flow in curved rectangular ducts. Fluid Mechanics, 217, 421–440.
4. Volkov, K. N., Yemelyanov, V. N. (2010). Tesheniya i teploobmen v kanalah I vrashtshayushihsyia polostyah [Flows and heat transfer in channels and rotating cavities]. Moskow: Fizmatgiz, 357.
5. Volkov, K. N., Yemelyanov, V. N. (2010). Gazoviye tetsheniya s masopodvodom v kanalah I traktah energoustanovok [Gas flow with mass supply in channels and paths of power plants]. Moskow: Fizmatgiz, 396.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ В КРИВОЛИНЕЙНЫХ КАНАЛАХ КОНФУЗОРНОГО ТИПА

В. Г. Горобец, Н. Ю. Масюк

Аннотация. *Прямолинейные и криволинейные каналы конфузорного типа могут быть использованы при разработке теплообменного и турбинного оборудования, новых типов ветрогенераторов и тому подобное. При их исследовании решается задача выбора такой геометрии канала, которая обеспечивает минимальные потери давления.*

Рассматривается конструкция канала конфузорного типа, который имеет криволинейные стены. При такой конструкции канала воздух входит во входное отверстие, проходит криволинейным каналом, который сужается, причем в соответствии с законом Бернулли скорость воздуха в выходном отверстии будет расти. Такие каналы могут быть использованы для повышения скорости ветрового потока в ветрогенераторах, что позволяет увеличить скорость вращения ротора ветрогенератора и повысить эффективность его работы. Криволинейные стенки канала выбираются так, чтобы минимизировать наличие отрывных зон в каналах и уменьшить в них аэродинамические потери.

Проведено математическое моделирование процессов переноса массы воздуха в криволинейном канале конфузорного типа, используя уравнения Навье-Стокса в двумерной постановке при ламинарном режиме течения, который характерен для движения воздушных потоков в каналах подобного типа.

Численное моделирование гидродинамических процессов в криволинейном канале конфузорного типа проводилось с использованием программного продукта САПР ANSYS Fluent 18.2. Установлено, что максимальные значения скорости наблюдаются в конечной части канала. У поверхности одной из стенок присутствует застойная зона, в которой воздух движется с очень малой скоростью, что обусловлено перпендикулярным направлением движения воздуха к входному отверстию.

Имеет место падение давления на выходе из канала. Вместе с тем, в количественном значении величина этого падения незначительна, что обусловлено наличием кривизны канала для потока воздуха в канале.

Наличие криволинейности стенок канала приводит к отсутствию отрывных зон воздуха, что обуславливает небольшие потери давления в каналах по сравнению с каналами других конфигураций. Это улучшает аэродинамические и энергетические характеристики ветрогенераторов.

Ключевые слова: *криволинейный канал, диффузор, давление, скорость, ламинарный поток*

MATHEMATICAL MODELING OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN CURVULAR CHANNELS OF THE CONFUSER TYPE

V. Gorobets, M. Masyuk

Abstract. *The rectilinear and curvilinear channels of the confusing type can be used in the development of heat exchange and turbine equipment, new types of wind turbines, and the like. Their research solves the problem of choosing such a geometry of the channel, which provides minimal loss of pressure.*

The design of a channel of a confusing type, which has curvilinear walls, is considered. With such a design, the air channel enters the inlet, passes through a curved channel that narrows, and in accordance with the law of Bernoulli, the air velocity in the outlet will increase. Such channels can be used to increase the wind speed in wind turbine generators, which enables to increase the speed of rotor wind turbine and improve the efficiency of its operation. The curvilinear walls of the channel are chosen in such a way as to minimize the presence of gap zones in the channels and reduce aerodynamic losses in them.

The mathematical modeling of air mass transfer processes in the curvilinear channel of the confusing type is carried out using the Navier-Stokes equation in a two-dimensional formulation under the laminar flow regime, which is characteristic for the movement of air flows in channels of this type.

Numerical simulation of hydrodynamic processes in the curvilinear channel of the confusing type was performed using the CAD software ANSYS Fluent 18.2. It is established that the maximum velocity values are observed in the end portion of the channel. At the surface of one of the walls, there is a stagnant zone in which the air moves at a very low speed due to the perpendicular direction of the air movement to the inlet.

There is a drop in pressure at the exit of the channel. However, in quantitative terms, the value of this fall is insignificant, due to the presence of curvature of the channel for air duct in the channel.

The presence of curvilinearity of the walls of the channel leads to the absence of breakaway air zones, which causes small pressure losses in the channels compared with the channels of other configurations. It improves aerodynamic and energy characteristics of wind turbines.

Key words: *curvilinear channel, confuser, pressure, speed, laminar flow*