

С. Д. КОСТОРНОЙ, Н. Д. МЕШКОВА, А. Ю. ХАТУНЦЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ И ОТРЫВА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

АННОТАЦИЯ При решении задач внешнего обтекания тел в бесконечном пространстве вихревое распределение обычно считается конечным. Площадь, занятая телами, моделируется как объем жидкости, на границе которой имеется тангенциальный разрыв вектора скорости. Величина скачка тангенциальной скорости определяется из интегрального уравнения, которое обеспечивает условие отсутствия течения через поверхность тела. Методом граничных элементов проведено моделирование развития и отрыва пограничного слоя на цилиндре и на крыловом профиле NASA 642-015A, при обтекании потоком на бесконечности. Рассчитано изменение напряжения трения, начиная с момента начала движения.

Ключевые слова: турбулентное течение, нестационарные характеристики, вихревой след, отрыв потока.

S. KOSTORNOY, N. MIESHKOVA, A. KHATUNTSEV

SIMULATION OF THE PROGRESS AND SEPARATION OF THE BOUNDARY LAYER USING THE METHOD OF BOUNDARY ELEMENTS

ABSTRACT Detached flows of the bodies are the most widely spread phenomena in nature and in engineering. The main specific feature of them is that the flow becomes transient after the separation. This scientific paper is devoted to the direct numerical simulation of the eddy transient flow of 2D objects. The purpose of this investigation was to test the methods used for the solution of the problem of transient flow of different objects in order to define transient power loads and turbulent characteristics of the flow. To solve the problem of external flow of the bodies in the infinite space the eddy motion distribution is usually considered to be final. This allows us to concentrate computational resources on these areas, reaching there a high resolution of the flow structure at relatively low expenditures. A great advantage of vortex models is that these allow of the gridless realization. One more advantage of vortex gridless methods is the simplicity of meeting the boundary conditions for the infinity to solve the problems of external flow. A region occupied by the bodies is simulated as a liquid volume whose boundary has a tangential discontinuity of the velocity vector. The tangential velocity jump value is derived from the integral equation that provides the flow tangency condition on the body surface. The medium outside the streamline body and the vortex wake is considered to be ideal. A method of finite elements was used for the simulation of progress and separation of the boundary layer on the cylinder and the wing profile NASA 642-015A for the infinity flow. A change in the friction stress was calculated starting from the motion origination time. These data and the methods can be used for further improvement of hydrodynamic properties of different hydraulic machines including power and erosion indices and the optimization of hydrodynamic loads on blade systems.

Key words: turbulent flow, transient characteristics, vortex wake and the flow separation.

Введение

При решении задач внешнего обтекания тел в бесконечном пространстве вихревое распределение обычно считается конечным. Площадь, занятая телами, моделируется как объем жидкости, на границе которой имеется тангенциальный разрыв вектора скорости. Величина скачка тангенциальной скорости определяется из интегрального уравнения, которое обеспечивает условие отсутствия течения через поверхность тела.

Основоположителем вихревых методов является метод дискретных вихрей, созданный для моделирования течений идеальной жидкости [1]. Метод был успешно применен для расчетов нестационарного обтекания тел со сходом вихревого следа на острых краях [2]. Для моделирования отрыва на гладкой поверхности использовался дискретный вихревой метод в сочетании с моделью пограничного слоя [3–4]. В [5–7] реализованы схемы, моделирующие генерацию завихренности по всей поверхности обтекаемых тел. С этой целью на каждом этапе во всех контрольных узлах объек-

та создавались свободные дискретные вихри и удалялись от него на некоторое расстояние h в зависимости от числа Рейнольдса. Точки схода вихревой пелены от поверхности получают автоматически. Метод чувствителен к выбору параметров расчетной сетки и значения h .

Цель исследования

Тестирование методики решения задачи нестационарного обтекания различных объектов с целью определения нестационарных силовых нагрузок и турбулентных характеристик потока.

Моделирование развития и отрыва пограничного слоя

Задача сводилась к нахождению суммарного вихревого слоя на теле и свободного вихревого следа за лопаткой. Среда вне обтекаемого тела и вихревого следа считалась идеальной. Задача обтекания решалась методом граничных элементов. Свободные вихревые пелены за лопастью модели-

© С. Д. Косторной, Н. Д. Мешкова, А. Ю. Хатунцев, 2017

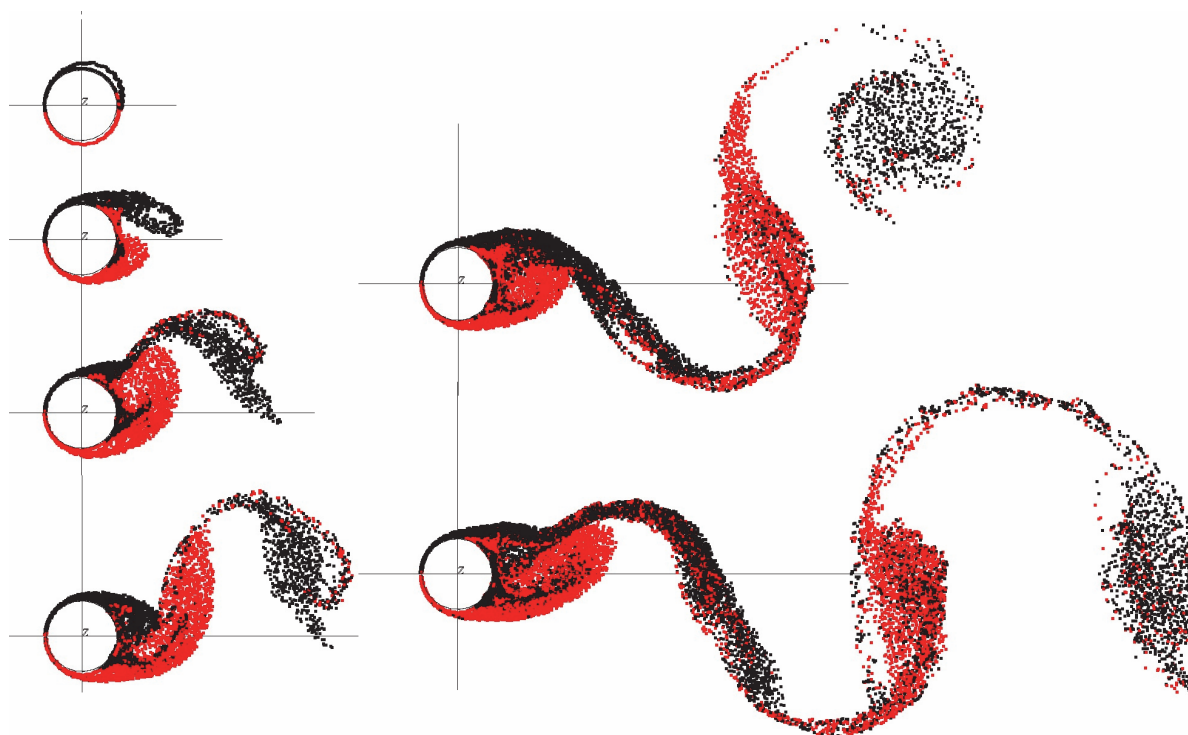
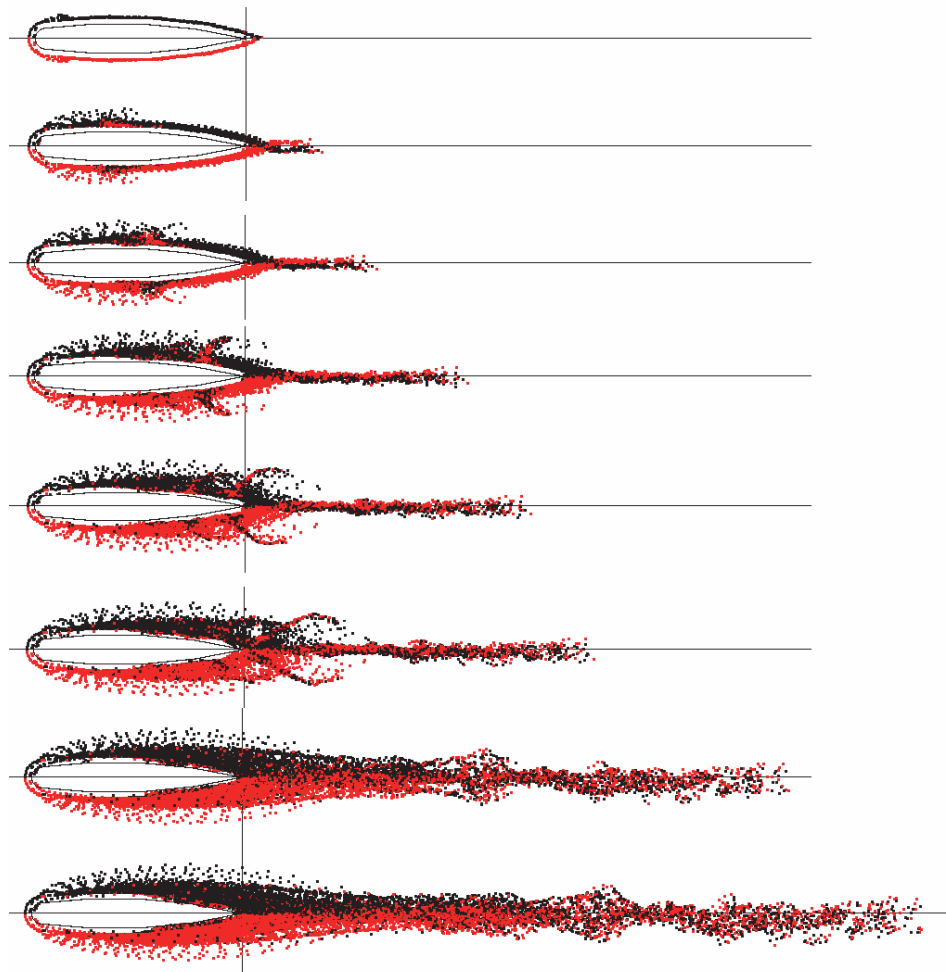
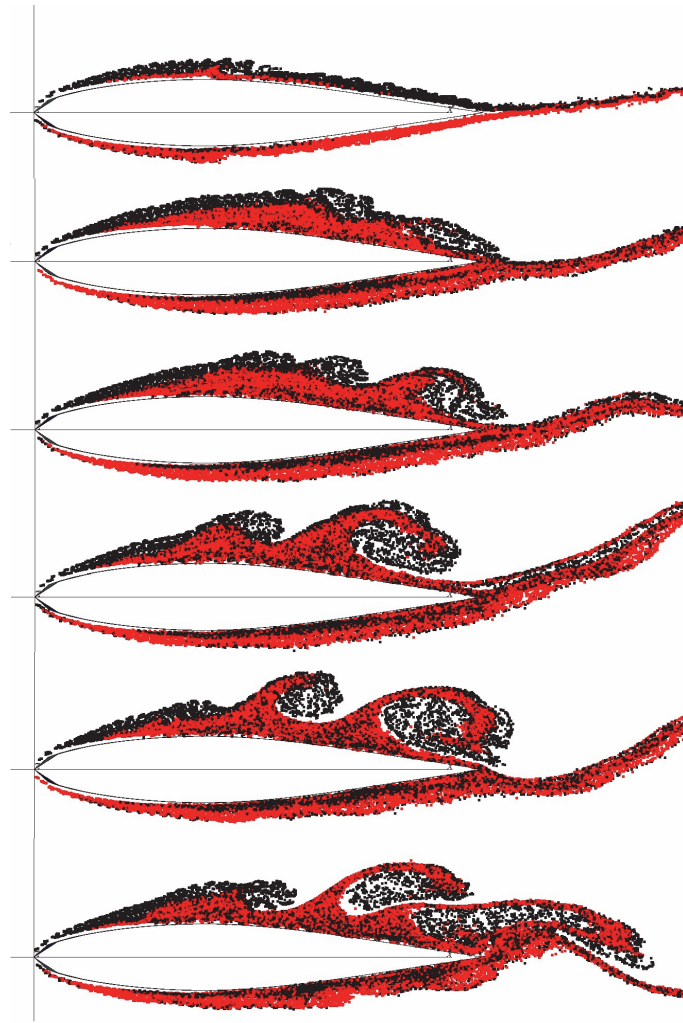


Рис. 1 – Результати моделювання розвитку і отрива пограничного слоя на циліндрі, $Re \sim 7500$



a



б

Рис. 2 — Результати моделювання розвитку і отрива пограничного слоя на профілі *NACA 642-015A*, $Re \sim 500$: а – угол атаки 0° ; б – угол атаки 10°

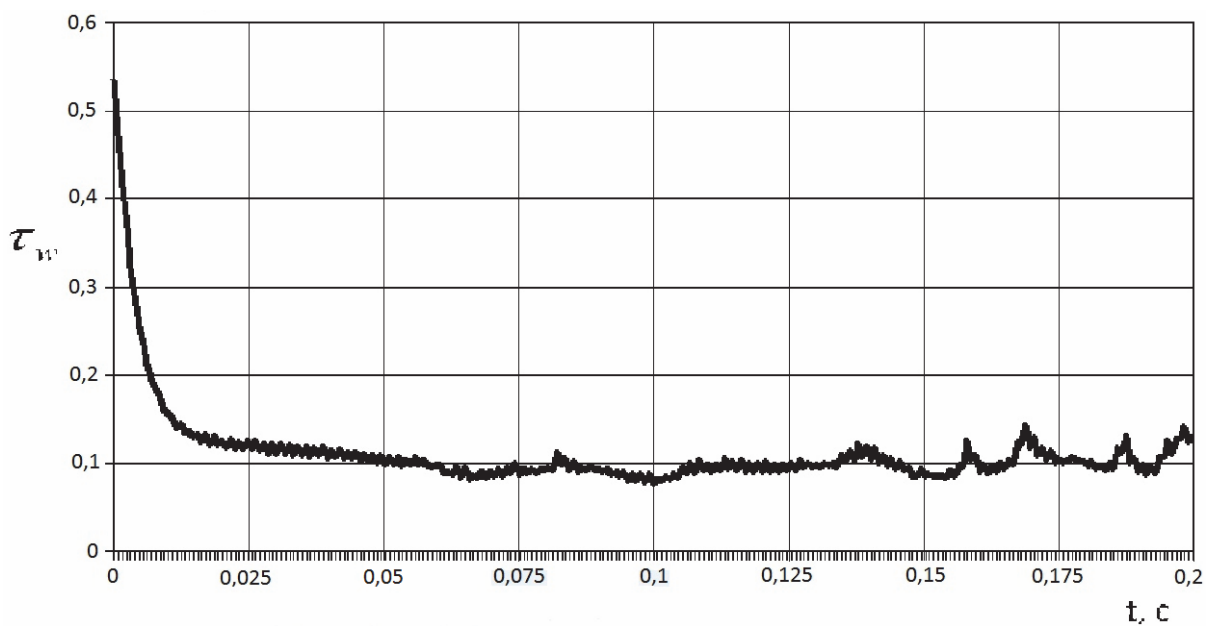


Рис. 3 — Изменение напряжения трения на профілі *NACA 642-015A* с углом атаки 10° , $Re \sim 500$

ровались вихревыми точечными особенностями, интенсивность которых определялась из граничных условий на каждом расчетном моменте времени.

Данная процедура с особенностями моделирования вязких течений [8], связанных с необходимостью удовлетворения условия прилипания на обтекаемых поверхностях, реализована при моделировании развития пограничного слоя на крыловом профиле NASA 642-015A, при обтекании потоком на бесконечности, с углами атаки 0° и 10° .

Тестирование методики проводилось на цилиндре. На рис. 1 результаты моделирования развития и отрыва пограничного слоя на цилиндре, $Re \sim 7500$.

На рис. 2 представлена структура пограничного слоя на профиле NASA 642-015A, обтекаемым потоком на бесконечности, с углами атаки 0° и 10° в различные моменты времени, начиная с начала движения. Принимается, что переход из состояния покоя до момента достижения максимальной скорости происходит мгновенно.

Расчет напряжения трения

В работах [9, 10] показано, что сила F , действующая на обтекаемое тело при отсутствии иных сил, действующих на жидкость, связана с гидродинамическим импульсом I формулой

$$F = -\frac{dI}{dt} - \rho \frac{d}{dt} \oint r \times (V \times n) dl, \quad (1)$$

где гидродинамический импульс

$$I = \rho \int_s r \times \Omega ds. \quad (2)$$

Дифференцируя (1) получим в случае равномерного поступательного движения тела при выполнении условия прилипания

$$F = -\rho \int_l r \times J dl - \rho \int_\Gamma V_d \times d\Gamma. \quad (3)$$

Первое слагаемое представляет собой результирующую сил давления, второе – сил трения. Напряжение трения τ_w выражается формулой

$$\tau_w(l) = -\rho \int_\Gamma I_w r(l), r(\Gamma) \times d\Gamma. \quad (4)$$

На рис. 3 изображен график изменения напряжения трения τ_w на крыловом профиле за 0,2 сек, начиная с момента начала движения.

Выводы

Полученные результаты и методика могут быть использованы для целенаправленного изменения и дальнейшего совершенствования гидродинамических качеств различных гидромашин, в частности энергетических показателей, оптимизации гидродинамических нагрузок на лопастных системах.

Список литературы

- 1 **Rosenhead, L.** Formation of vortices from a surface of discontinuity / **L. Rosenhead** // Proc: Roy. Soc. – 1931. – Series A, Vol. 134. – P. 170–192.
- 2 **Белоцерковский, С. М.** Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью / **С. М. Белоцерковский, М. И. Ништ.** – Москва : Наука, 1978. – 351 с.
- 3 **Белоцерковский, С. М.** Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел / **С. М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ, Р. М. Федоров.** – Москва : Наука, 1988. – 232 с.
- 4 **Белоцерковский, С. М.** Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей / **С. М. Белоцерковский, А. С. Гиневский.** – Москва : Физ-мат. лит., 1995. – 367 с.
- 5 **Павловец, Г. А.** Об одной возможной схеме расчета отрывного обтекания тел / **Г. А. Павловец, А. С. Петров** // Труды ЦАГИ. – 1974. – Вып. 1571. – 12 с.
- 6 **Марчевский, И. К.** Об одном подходе к расчету аэродинамических характеристик профиля в идеальной жидкости методом дискретных вихрей / **И. К. Марчевский, Г. А. Щеглов** // Вестник НТУ «ХПИ». – 2005. – Вып. 4, № 6. – С. 182–191.
- 7 **Щеглов, Г. А.** Об одной гипотезе вихреобразования для расчета гидродинамической нагрузки, действующей на двухсредний упругий летательный аппарат / **Г. А. Щеглов, С. В. Аринчев** // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления. – 2003. – № 590. – С. 244–248.
- 8 **Косторной, С. Д.** Модель течения идеальной жидкости, учитывающая особенности граничных условий реальной жидкости / **С. Д. Косторной** // Труды XVII международного симпозиума «Метод дискретных особенностей в задачах математической физики», Харьков-Сумы, 2015. – С. 126–129.
- 9 **Сеффмен, Ф. Дж.** Динамика вихрей / **Ф. Дж. Сеффмен.** – Москва : Науч. Мир, 2000. – 367.
- 10 **Андронов, П. Р.** Вихревые методы расчёта нестационарных гидродинамических нагрузок / **П. Р. Андронов, С. В. Гувернюк, Г. Я. Дынникова.** – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2006. – 184 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Rosenhead, L.** (1931), "Formation of vortices from a surface of discontinuity", *Proc: Roy. Soc, Series A, Vol. 134*, pp. 170-192.
- 2 **Belotserkovskii, S. M. and Nisht, M. I.** (1978), *Otryvnoe i bezotryvnoe obtekanie tonkikh krylev idealnoi zhidkosti* [Separated and unseparated flow past around thin wing located in nonviscous fluid], Nauka, Moscow, Russia.
- 3 **Belotserkovskii, S. M., Kotovskii, V. N., Nisht, M. I. and Fedorov, R. M.** (1988), *Matematicheskoe modelirovanie ploskoparallelnogo otryvnogo obtekaniiia tel* [Mathematical modeling of plane-parallel separated flow around objects], Nauka, Moscow, Russia.
- 4 **Belotserkovskii, S. M. and Ginevskii, A. S.** (1995), *Modelirovanie turbulentykh strui i sledov na osnove metoda diskretnykh vikhrei* [Modeling of turbulent streams and wakes using discrete vortex method], Fiz-

- mat. Lit., Moscow, Russia.
- 5 **Pavlovets, G. A. and Petrov, A. S.** (1974), "Ob odnoi vozmozhnoi skheme rascheta otrivnogo obtekania tel [About one possible computation scheme of separated flow pasted around body]", *Trudy TSAGI*, No. 1571.
 - 6 **Marchevskiy, I. K. and Shcheglov, G. A.** (2005), "Ob odnom podhode k raschetu aerodinamicheskikh kharakteristik profilia v idealnoi zhidkosti metodom diskretnykh vikhrei [About one approach to calculate aerodynamic characteristics of aerofoil in nonviscous fluid using discrete vortex method]", *Vestnik NTU "HPI"*, Vol. 4, No. 6, pp. 182–191.
 - 7 **Shcheglov, G. A. and Arinchev, S. V.** (2003), "Ob odnoi gipoteze vikhreobrazovaniia dlia rascheta gidrodinamicheskoi nagruzki, deistvuiushchei na dvukhsrednyi uprugii letatel'nyi apparat [About one hypothesis of vortex creation used for evaluation of hydrodynamic load acting on double-medium elastic flying machine]", *Vestnik NTU "HPI"*. *Seria: Matematicheskoe modelirovanie. Informatsionnye tekhnologii. Avtomatizirovannye sistemy upravleniia*, No. 590, pp. 244–248.
 - 8 **Kostornoy, S. D.** (2015), "Model techeniia idealnoi zhidkosti, uchityvaiushchaia osobennosti granichnykh uslovii realnoi zhidkosti [Nonviscous fluid model which takes into account peculiarities of real fluid boundary conditions]", *Trudy XVII mezhdunarodnogo simpoziuma "Metod diskretnykh osobennostei v zadachakh matematicheskoi fiziki"*, Kharkov-Sumy, pp. 126–129.
 - 9 **Saffman, P. G.** (2000), *Dinamika vikhrei [Vortex dynamics]*, Nauchnyi mir, Moscow, Russia.
 - 10 **Andronov, P. R., Guvernjuk, S. V. and Dynnikova, G. Y.** (2006), *Vihrevye metody raschjota nestacionarnykh gidrodinamicheskikh nagruzok [Vortex methods used for evaluation of transient hydrodynamics loads]*, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, Moscow, Russia.

Сведения об авторах (About authors)

Косторной Сергей Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, Сумской государственный университет; г. Сумы, Украина; e-mail: kostornoysd@mail.ru.

Sergey Kostornoy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy State University; Sumy, Ukraine

Мешкова Наталия Дмитриевна – ПАО «ВНИИАЭН»; г. Сумы, Украина; e-mail: mieshkova.nd@gmail.com, ORCID 0000-0003-4697-5244.

Nataliia Mieshkova – JSC «VNIIAEN», Sumy, Ukraine.

Хатунцев Андрей Юрьевич – кандидат технических наук, ПАО «ВНИИАЭН»; г. Сумы, Украина; e-mail: anxat@ukr.net, ORCID 0000-0002-5292-0154.

Andrey Khatuntsev – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), JSC «VNIIAEN»; Sumy, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Косторной, С. Д. Моделирование развития и отрыва пограничного слоя методом граничных элементов / **С. Д. Косторной, Н. Д. Мешкова, А. Ю. Хатунцев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 92–96. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.14.

Please cite this article as:

Kostornoy, S., Mieshkova, N. and Khatuntsev, A. (2017), "Simulation of the Progress and Separation of the Boundary Layer Using the Method of Boundary Elements", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 8(1230), pp. 92–96, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.14.

Будь ласка посилаетесь на цю статтю наступним чином:

Косторной, С. Д. Моделювання розвитку та відриву граничного шару методом граничних елементів / **С. Д. Косторной, Н. Д. Мешкова, А. Ю. Хатунцев** / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 92–96. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.14.

АНОТАЦІЯ При розв'язанні задач зовнішнього обтікання тіл в безграничному просторі розподіл завихреності вважається фінітним. Область, зайнята тілами, моделюється як рідкий об'єм, на границі якого має місце тангенціальний розрив вектору швидкості. Величина розриву тангенціальної швидкості визначається з інтегрального рівняння, що забезпечує умову непротікання на поверхні тіла. Методом граничних елементів проведено моделювання розвитку та відриву граничного шару на циліндрі та крилового профілі *NACA 642-015A*, при обтіканні потоком на нескінченності. Розраховано зміну напруги тертя, починаючи з моменту початку руху.

Ключові слова: турбулентний плин, нестационарні характеристики, вихровий слід, відрив потоку.

Поступила (received) 03.02.2017