

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ВХОДЕ ВО ВСАСЫВАЮЩИЕ КАНАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ВИХРЕЙ В НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОСТАНОВКЕ*

olga_19572004@mail.ru

Разрабатывается метод математического моделирования отрывных течений на входе во всасывающие каналы в многосвязных областях с разрезами. Программно-алгоритмическая реализация метода позволила построить поле скоростей на входе во всасывающий канал с выступом. Произведены сравнения с опытными данными.

Ключевые слова: отрывные течения, всасывающие каналы, метод дискретных вихрей.

Для исследования отрывных течений на входе во всасывающие каналы используются метод Н.Е. Жуковского [1-4], метод дискретных вихрей в нестационарной постановке [5-7], метод дискретных вихрей в стационарной постановке [8]. Актуальность исследования отрывных течений не вызывает сомнения, поскольку это необходимо для разработки эффективных аспирационных систем сниженной энергоемкости [9-14]. Целью данной работы является исследование ма-

тематической модели отрыва потока, построенной на основе метода дискретных вихрей в нестационарной постановке.

Расчетная область течения задачи, решаемой методом дискретных вихрей, изображена на рис.1. Геометрические размеры укрытия: $AB = 1,2\text{м}$; $CB = 0,5\text{м}$; $CD = 0,3\text{м}$; $DE = 0,1\text{м}$; $EF = 0,1\text{м}$; $FK = 0,4\text{м}$; $KL = 0,1\text{м}$. Скорость в отсосе $0,52\text{ м/с}$.

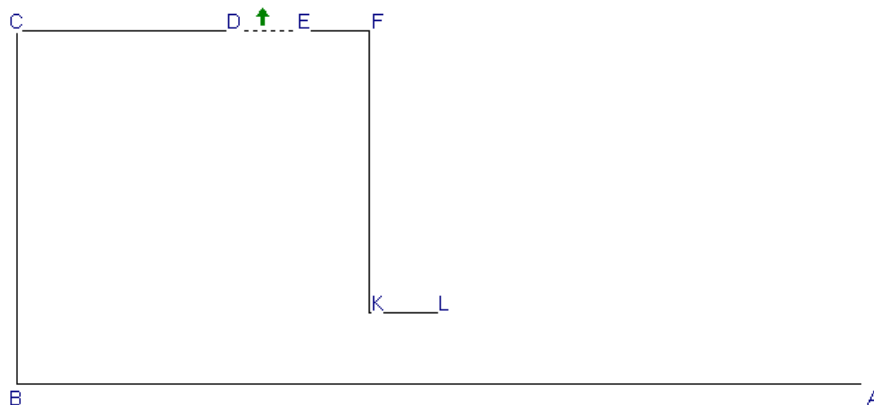


Рис. 1. К постановке задачи

Математическая постановка задачи состоит в решении уравнения Лапласа для потенциальной функции φ в каждый расчетный момент времени: $\Delta\varphi = 0$, при заданных значениях граничной нормальной составляющей скорости

$$\left. \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right|_S = v_n(x) - U_n, \text{ где } x - \text{точка границы } S.$$

Функция U_n выражает влияние свободных вихрей, сходящих в поток с острой кромки L в каждый расчетный момент времени.

Границу области дискретизируем набором присоединенных вихрей и контрольных (расчетных точек). Расстояние между присоединенными вихрями $0,01\text{м}$. На изломах и концах линий должны быть расположены вихри. По середине, между двумя присоединенными вихрями находятся кон-

трольные точки. Тогда, если присоединенных вихрей N , то контрольных точек $N-1$.

Рассмотрим начальный момент времени $t = +0$, когда включается всасывающее отверстие. В этот момент времени в области содержатся только присоединенные вихри. Влияние всех этих вихрей на контрольную точку x^p вдоль направления нормали определяется из выражения:

$$v_n(x^p) = \sum_{k=1}^N G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k), \quad (1)$$

где

$$G(x^p, \xi^k) = \frac{(x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1}{2\pi \left[(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 \right]};$$

(x_1, x_2) - координаты точки x^p ; (ξ_1, ξ_2) - координаты присоединенного вихря с циркуляци-

ей $\Gamma(\xi^k)$, расположенного в точке $\xi^k; \{n_1, n_2\}$ - координаты орта вектора нормали \vec{n} к границе области; $v_n(x^p)$ - скорость в точке x^p вдоль направления \vec{n} , которая известна при постановке задачи.

Изменяя p от 1 до $N-1$ в выражении (1) получим систему $N-1$ уравнений с N неизвестными циркуляциями $\Gamma(\xi^k)$, где $k = \overline{1, N}$. Дополним рассматриваемую систему уравнением, являющимся дискретным аналогом условия Томпсона – неизменности циркуляции по жидкому контуру, охватывающему профиль и след (сумма циркуляций присоединенных вихрей, расположенных на данной линии и свободных вихрей, сходящихся с нее, равна нулю) [15]. Тогда получим замкнутую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k) = v_n(x^p); & p = \overline{1, N-1}, \\ \sum_{k=1}^N \Gamma(\xi^k) = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k) + \sum_{\tau=1}^m G(x^p, \zeta^\tau) \gamma(\zeta^\tau) = v_n(x^p); & p = \overline{1, N-1}, \\ \sum_{k=1}^N \Gamma(\xi^k) + \sum_{\tau=1}^m \gamma(\zeta^\tau) = 0, \end{cases}$$

где $\gamma(\zeta^\tau)$ - циркуляция свободного вихря сошедшего с острой кромки в момент времени τ , расположенного в точке ζ^τ .

Скорость в любой заданной точке определяется из выражения:

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^N G(x, \xi^k) \Gamma(\xi^k) + \sum_{\tau=1}^m G(x, \zeta^\tau) \gamma(\zeta^\tau).$$

В каждый расчетный момент времени определяются новые положения свободных вихрей по формулам:

$$x' = x + v_x \Delta t, \quad y' = y + v_y \Delta t,$$

где v_x, v_y - составляющие скорости, вычисляемые по предыдущей формуле $\vec{n} = \{1, 0\}$ и $\vec{n} = \{0, 1\}$ соответственно. Шаг по времени в расчетах $\Delta t = 0,01$ с.

Если свободный вихрь приближался к непроницаемой границе на расстояние меньше λ (расстояние между соседними присоединенным вихрем и контрольной точкой), то он отодвигался от нее по нормали на расстояние λ . Если же свободный вихрь приближался к всасывающему отверстию на тоже расстояние, то вихрь удалялся из рассмотрения.

После определения неизвестных циркуляций скорость в любой точке области вдоль любого заданного направления определяется из выражения (1), где вместо x^p подставляется рассматриваемая точка.

В каждый момент времени происходит отрыв свободных вихрей с острой кромки L . Строго говоря вихрь лежащий на этой кромке уже является свободным, поскольку по доказанной в работе [15] гипотезе Чаплыгина-Жуковского-Кутта присоединенный вихревой слой на профиле, с которой сходит пелена свободных вихрей обращается в нуль. Сход свободных вихрей осуществляется по направлению скорости потока. Циркуляции свободных вихрей с течением времени не изменяются.

С учетом сошедших свободных вихрей система уравнений для определения неизвестных циркуляций присоединенных вихрей в момент времени $t = m \cdot \Delta t$ имеет вид:

В случае приближения к вихрю на расстояние $x < \lambda$ величина скорости им вызываемой определялась из формулы:

$$v(x) = xv / \lambda,$$

где v - скорость, вызываемая вихрем на расстоянии λ .

По разработанной компьютерной программе, рассчитано поле скоростей (рис. 2), где видно удовлетворительное согласие расчетов и натурного эксперимента.

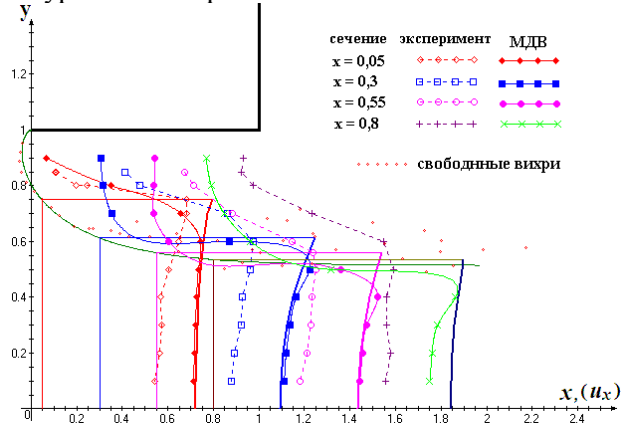


Рис. 2. Профили скоростей во всасывающей щели

Таким образом, с использованием идеологии метода дискретных вихрей в нестационар-

ной постановке построен метод математического моделирования нестационарных вихревых течений на входе во всасывающие каналы, в спектре действия которых могут находиться разрезы (тонкие тела).

**Исследования выполнены при поддержке Совета по грантам Президента РФ (код проекта НШ-588.2012.8).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Посохин, В.Н.* К расчету течения вблизи щелевидного отсоса-раструба/ В.Н. Посохин, Н.Б. Салимов, К.И. Логачев, А.М. Живов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2002. – № 10. – С. 81-84.
2. *Логачев, И.Н.* Моделирование отрывных течений вблизи всасывающей щели/ И.Н. Логачев, К.И. Логачев, В.Ю. Зоря, О.А. Аверкова // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2010. – Т. 11. – № 1. – С. 43-52.
3. *Логачев, И.Н.* Математическое моделирование отрывных течений при входе в экранированный плоский канал/ И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2010. – Т. 11. – № 1. – С. 68-77.
4. *Логачев, И.Н.* Математическое моделирование струйного течения воздуха при входе в плоский канал с козырьком и непроницаемым экраном/ И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2010. – Т. 11. – № 1. – С. 160-167.
5. *Логачев, К.И.* Расчет течений на входе в отсосы-раструбы методом дискретных вихрей/ К.И. Логачев, А.И. Пузанок, В.Н. Посохин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2004. – № 7-8. – С. 61-69.
6. *Логачев, К.И.* Закономерности изменения дисперсного состава пылевых аэрозолей в аспирационном укрытии/ К.И. Логачев, О.А. Аверкова, В.Ю. Зоря // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – № 9. – С. 46-52.
7. *Аверкова, О.А.* Особенности поведения аэрозольных частиц в аспирационном укрытии стандартной конструкции/ О.А. Аверкова, В.Ю. Зоря, К.И. Логачев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – № 11. – С. 34-36.
8. *Логачев, К.И.* Расчет течения вблизи круглого всасывающего патрубка/ К.И. Логачев, В.Н. Посохин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2004. – № 1. – С. 29-32.
9. *Логачев, И.Н.* Характеристика пылевых выбросов при перегрузках сыпучих материалов / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2009. – № 3. – С. 63-67.
10. *Логачев, К.И.* Численное моделирование пылевоздушных течений вблизи вращающегося цилиндра-отсоса / К.И. Логачев, А.И. Пузанок // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2005. – № 9. – С. 63-70.
11. *Логачев, К.И.* Компьютерное моделирование пылегазовых потоков в пульсирующих аэродинамических полях/ К.И. Логачев, А.И. Пузанок, В.Ю. Зоря // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2006. – Т. 7. – № 1. – С. 195-201.
12. *Логачев, К.И.* Численное исследование поведения пылевой аэрозоли в аспирационном укрытии/ К.И. Логачев, И.Н. Логачев, А.И. Пузанок // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2006. – № 5. – С. 65-71.
13. *Логачев, И.Н.* О прогнозировании дисперсного состава и концентрации грубодисперсных аэрозолей в местных отсосах систем аспирации/ И.Н. Логачев, К.И. Логачев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2002. – № 9. – С. 85-90.
14. *Аверкова, О.А.* К вопросу о моделировании пылегазовых потоков в аспирационном укрытии/ О.А. Аверкова, В.Ю. Зоря, И.Н. Логачев, К.И. Логачев // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2009. – Т. 10. – № 1. – С. 371-376.
15. *Лифанов И.К.* Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент/ И.К. Лифанов. – М.: Янус, 1995. – 520с.