

УДК 525.7

ББК 39.15

Д181

Н. В. Даниленко

Иркутск, Россия

А. Г. Киренчев

Иркутск, Россия

**КОНВЕРТАЦИЯ ВИХРЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВЫСОТЫ
РАСПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУХОЗАБОРНИКА НАД ПОДСТИЛАЮЩЕЙ
ПОВЕРХНОСТЬЮ**

В статье исследуется проблема вихреобразования локальных стоковых течений, генерируемых техногенным стоком – работой ГТД на земле. Дан анализ классификации вихрей и установлены пути проведения экспериментальных исследований. Предложены условия экспериментального исследования вихрей кориолисовой силы, парных вихрей интерференции корпуса воздухозаборника (ВЗ) с подстилающей поверхностью и кольцевого вихря интерференции стокового потока с поверхностью аэродрома (земли). Изложены особенности конструктивной компоновки экспериментальной установке для исследования указанной гаммы вихрей.

Ключевые слова: локальное стоковое течение, вихри воздухозаборника, классификация стоковых вихрей, рабочий процесс вихреобразования, конвертация вихрей.

N. V. Danilenko

Irkutsk, Russia

A. G. Kirenchev

Irkutsk, Russia

**VORTEX CONVERSION WITH VARYING HEIGHT OF AN AIR
INTAKE ABOVE THE UNDERLYING TERRAIN**

The article considers the issue of vortex formation of local gravity flows generated by an anthropogenic outflow (GTE operation on the ground). The vortex

classification is analyzed and experimental research ways are determined. The authors suggest conditions for experimental research of vortices influenced by Coriolis force, vortex pairs of air intake case / underlying terrain interference, and a circular vortex of gravity flow / ground interference. The composite design peculiarities of the test installation for researching the vortex range are described.

Key words: local gravity flow, air intake vortices, vortex classification, process of vortex formation, vortex conversion.

История появления вихрей ВЗ берёт своё начало с момента появления реактивных самолетов, тяга двигателей которых создается забором воздуха из внешней среды и ускорением его в проточной части силовой установки с ГТД. При работе газотурбинного двигателя на земле на максимальных режимах специалисты заметили появление перед ВЗ одиночных вертикально ориентированных вихрей малой интенсивности. Первоначально указанные вихри не оказывали существенного влияния на режим работы двигателя и не вызывали беспокойства специалистов, обслуживающих ВС.

По мере увеличения тяги двигателя возрастал секундный массовый расход воздуха по его проточной части. Активировалось стоковое течение перед ВЗ и у подстилающей поверхности. Вихрь ВЗ становился заметным по признакам поднятой в воздух пыли и засасыванию в ВЗ мелких посторонних предметов (ПП). Были случаи срыва не только головных уборов обслуживающего персонала, близко расположенного к входу в ВЗ, но и других предметов, обтекаемых стоковым потоком. Последствием такого явления стали разрушения проточной части СУ и двигателя, омываемых воздушным потоком. Разрушения лопаток рабочих колес и направляющих аппаратов компрессора вели к ДСД с эксплуатации.

Создание и эксплуатация двухконтурных двигателей активировало указанную проблему засасывания ПП, ставших причиной ДСД. Учёные обратили внимание на рост активности засасывания ПП и ДСД с увеличением степени двухконтурности ГТД. Ими установлен факт вихревого засасывания

ПП, в основу которого положено увеличение тангенциальной скорости и кинетической энергии (динамического давления) стокового потока у подстилающей поверхности, более раннего страгивания ПП с места, омывание их этим потоком и увлечение в проточную часть СУ с ГТД. Появились проблемы "вихревого засасывания" ПП, а также сущности и рабочего процесса (РП) вихреобразования (ВО) перед ВЗ, как газодинамического явления стоковой среды.

Первые исследования вихрей ВЗ были направлены на поиск аналогов. Ими стали смерчи, редко возникающие в атмосферной среде. Выявление аналога вихрям ВЗ не решило проблему установления их сущности, так как смерчи (торнадо в США) и ныне остаются загадкой для ученых NASA и других научных организаций, занимающихся указанной проблемой.

По мнению авторов статьи, путь исследования вихрей ВЗ с последующим переносом полученных результатов на смерчи и торнадо является более доступным, экономичным, безопасным и перспективным. Следовательно, в статье выделяется внимание сущности и РП вихрей ВЗ, возникающих при работе ГТД на земле и аналогичных им гидродинамическим вихрям в стоковых течениях жидкости.

Решение задачи исследования вихрей ВЗ потребовало преодоления ошибок, допущенных зарубежными учеными при исследовании торнадо. Главной из их ошибок было рассмотрение торнадо, как простого газодинамического явления с единым рабочим процессом, построенным на принципе отклоняющего действия кориолисовой силы. По методу их исследования торнадо должен вращаться в Северном полушарии против часовой стрелки, а в Южном полушарии - наоборот. Факты наблюдения за торнадо показали, что эти вихри в Северном полушарии вращаются как против, так и по часовой стрелке. Указанный дуализм вращения торнадо стал вторым препятствием зарубежных ученых (ученых США и др.) в познании их РП. За ним следовала психологическая проблема наших ученых, которые периодически отслеживали и копировали работу внешних специалистов, исследующих атмосферные

вихревые явления. Проблемы познания ВО за рубежом стали тормозом активности процесса познания вихрей ВЗ нашими учеными.

Путь решения проблемы ВО перед ВЗ лежал в рассмотрении вихрей воздухозаборников как сложного газодинамического явления и установления их классификации по признакам РП. Существующая классификация вихрей ВЗ по внешним признакам стала тупиковым направлением в познании их сущности.

Авторам работы пришлось устанавливать элементы РП вихрей ВЗ. Выяснилось, что вихри ВЗ являются "продуктом" стокового течения потока на его входе. Установлено, что эти вихри определены двумя особенностями – сбора внешней завихренности и интерференционных эффектов стокового течения у подстилающей поверхности и её аналогов (внешней поверхности ВЗ, фюзеляжа ВС, его крыла и т.д.). Исследование теории вихрей [Даниленко, 2011] показало, что в стоковой среде ВЗ так же существуют вихри дифференциального типа, построенные на редко упоминаемом следствии теоремы Гельмгольца о постоянстве циркуляций по длине вихревого шнура (вихря) [Лойцянский, 1978]. Указанные направления познания вихрей ВЗ позволили установить многоликость их физической сущности и сформировать их классификацию по сущности РП вихреобразования. Такая классификация представлена на рисунке 1. Она является основой для выделения объекта исследования вихревого явления, соответствующего индивидуальной, только ему присущей физической природе. А также она крайне необходима для установления частных граничных условий ВО и разработки программ как математического, так и экспериментального моделирования.



Рис. 1. Классификация вихрей ВЗ по сущности рабочего процесса и внешнего проявления.

Классификация вихрей ВЗ подтверждает, что они являются вихрями стокового типа, так как возникают только в стоковом течении.

По сущности рабочего процесса ВО возможно формирование пяти классов вихрей ВЗ. Определяющими из них являются интерференционные вихри и вихри кориолисовой силы.

Интерференционные вихри являются следствием взаимодействия стокового течения с подстилающей поверхностью и поверхностями обшивки ВЗ, фюзеляжа ВС и прилегающих к воздухозаборнику поверхностей крыла и его подвесок в виде мотогондол смежно расположенных двигателей и других элементов ВС.

Основу интерференционного ВО составляет силовое воздействие на стоковую среду физических тел, газодинамических струй и потоков. Математическое обоснование интерференционного ВО вблизи обтекаемого тела заложено в теореме Н.Е. Жуковского о подъёмной силе крыла Y [Ништ, 1994]:

$$Y = \rho V \Gamma l,$$

где Γ – циркуляция скорости вокруг крыла, ρ – плотность воздуха, V – скорость набегающего потока и l – размах крыла.

Как видим, силовое воздействие крыла на поток ($Y \neq 0$) сопровождается циркуляцией скорости вокруг профиля крыла. При конечном размахе крыла с его боковых кромок сходят мощные вихри (рис. 2).



Рис. 2. Концевые вихри ВС – следствие циркуляционного обтекания его крыла

Таким образом, под ВЗ при силовом воздействии интерферирующих поверхностей на стоковое течение проявляются следующие газодинамические особенности:

– динамическое поджатие струек тока подстилающей поверхностью к точке "а" и линии мнимого стока $a-a'$ (рис. 3) воздушного потока, засасываемого двигателем в ВЗ;

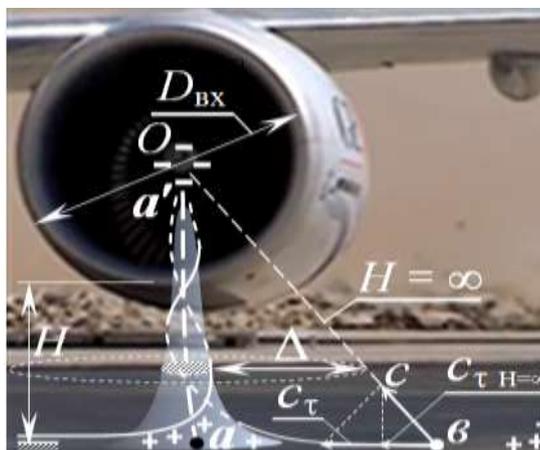


Рис. 3. Эффект интерференции экрана со стоком ВЗ

– аккумуляция внешней и интерференционной завихренности стокового потока, определяемая свойством вихрей замыкаться на поверхность раздела сред [Лойцянский, 1978];

– силовое вытеснение потока боковыми стенками ВЗ и другими поверхностями, примыкающими к стоковому течению;

– силовое воздействие реверсивных и других струй на стоковое течение ВЗ у подстилающей поверхности;

– наличие интерференции подстилающей поверхности со стоковым течением, активирующей сбор вихревых особенностей, сформированных перечисленными выше интерференционными эффектами .

Сущность поджатия струек тока (вихрей) заключена в преобразовании радиально сходящегося потенциального стокового течения в плоскопараллельное течение вдоль подстилающей поверхности в точку мнимого стока с формированием зоны положительных градиентов избыточного давления, являющейся генератором вихрей вязкого и градиентного срыва у этой поверхности под ВЗ. Поджатие струек тока (вихрей) сопровождается ростом плотности их циркуляции и активации стокового вихря вплоть до формирования вихревой трубки, визуально проявляющей себя инверсией пара и другими средствами его визуализации.

Эффект аккумуляции внешней завихренности является пусковым механизмом образования вихря ВЗ от притекающих естественных и интерференционных вихрей. Источниками внешней завихренности также могут быть вихри от реактивных струй собственного двигателя при реверсе его тяги, других двигателей при работе их на земле, а также срывного обтекания техники, перемещающейся по аэродрому, и аэродромных строений.

Из сказанного следует, что генераторами "запуска" вихря ВЗ являются вихри внешней завихренности от проходящих циклонов и его атмосферных фронтов (рис. 4), а также вихри кориолисовой силы, не признанные ныне многими учеными в силу малости абсолютного значения её модуля в поле угловой скорости ω суточного вращения Земли. В действительности указанное утверждение не правомочно для стоковых течений ВЗ по двум причинам:

– стоковое течение под ВЗ в поле замыкания вихря на подстилающую поверхность превращается в газодинамическое "устройство" аккумуляции внешней завихренности вокруг линии мнимого стока;

– саккумулированная завихрённость превращается в основной пусковой "механизм" для образования вихря ВЗ. Набрал силу, вихрь ВЗ становится дополнительным источником раскрутки его стоковой среды и выхода вихревого движения под ВЗ на установившийся уровень в виде мини–торнадо (мини–смерча), представленного на рисунке 5.

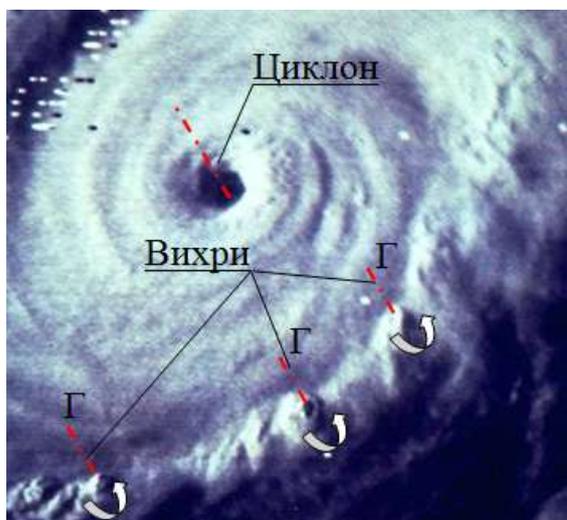


Рис.4. Структура циклона



Рис.5. Вихрь воздухозаборника

По сущности рабочего процесса классификация вихрей ВЗ также содержит вихри, генерируемые боковым обтеканием его наружной поверхности при работе двигателей на земле. Сущность образования таких вихрей определена разностью скоростей перед входом в ВЗ и за его входным сечением. Действительно скорость потока под ВЗ при боковом ветре оказывается выше скорости стокового потока перед воздухозаборником. Следовательно, разность указанных скоростей формирует градиенты скорости, угловое вращение стокового потока и образование мощных стоковых вихрей. Причем эти вихри садятся с тыльной стороны ВЗ на его входе.

Особым способом генерации вихрей на входе в ВЗ является закрутка потока перед компрессором ГТД лопатками рабочего колеса первой ступени двигателя. Как правило, подобные вихри реализуются при малой длине ВЗ и дозвуковых скоростях стокового потока по длине его проточной части. При этом возмущения закрутки потока ротором передаются газодинамическим путем на вход в воздухозаборник и на стоковый поток у подстилающей

поверхности. Знак циркуляции вихря строго определен направлением вращения ротора ГТД.

Стоит проблема экспериментального и математического моделирования вихрей ВЗ в поле стокового течения, завихренности внешней окружающей среды и интерференционного ВО от стенок воздухозаборника или поверхностей ВС, примыкающих к стоковому течению. Сущность указанной проблемы определена количеством и многоликостью фактора влияния на ВО перед ВЗ. Её решение заключено в исследовании и моделировании вихрей ВЗ по сущности рабочего процесса представленной в классификации (см. рис.1).

Экспериментальные исследования вихрей в водной среде проводились в установке «Гидробассейн» (рис. 6).



Рис.6. Установка «Гидробассейн»

Для моделирования работы ВЗ в рабочую часть гидробассейна помещалась система полипропиленовых патрубков, имитирующая входное устройство ГТД. Её выходной патрубок соединялся со сливом, что позволило обеспечить необходимый расход рабочей среды (жидкости) через модель воздухозаборника. В качестве подстилающей поверхности использовалась пластмассовая пластина размером в 50 x 30 см, что эквивалентно $10 \times 6D_{ВЗ}$ (рис. 7). Для исключения срывного обтекания [Белоцерковский, 1978], края пластины имеют скругления достаточной кривизны. Линии стока потока

жидкости под ВЗ визуализировались подкрашивающей жидкостью (тушью), подводимой в двух точках, равноудаленных от оси линии мнимого стока.



Рис.7. Модель ВЗ с подстилающей поверхностью (экраном)

Порядок проведения эксперимента:

1. Устанавливаем модель подстилающей поверхности на определенную высоту под моделью ВЗ.
2. Заполняем гидробассейн водой.
3. Необходимо дать отстояться воде 5 – 10 минут для исключения возмущений.
4. Открываем слив и подаем подкрашивающую жидкость.
5. Производим документирование результатов эксперимента (рис.8).
6. Повторяем пункты 2 – 5 для следующей высоты H расположения модели ВЗ (модели подстилающей поверхности под ней).
7. По результатам эксперимента можно сделать вывод, что при уменьшении высоты ВЗ одиночный вихрь (рис. 8 а, б), сначала переходит в парные вихри (рис. 8, в), затем в вихри размытой интенсивности (рис. 8, г). Для подтверждения достоверности данных результатов проводим подобный эксперимент в воздушной среде.

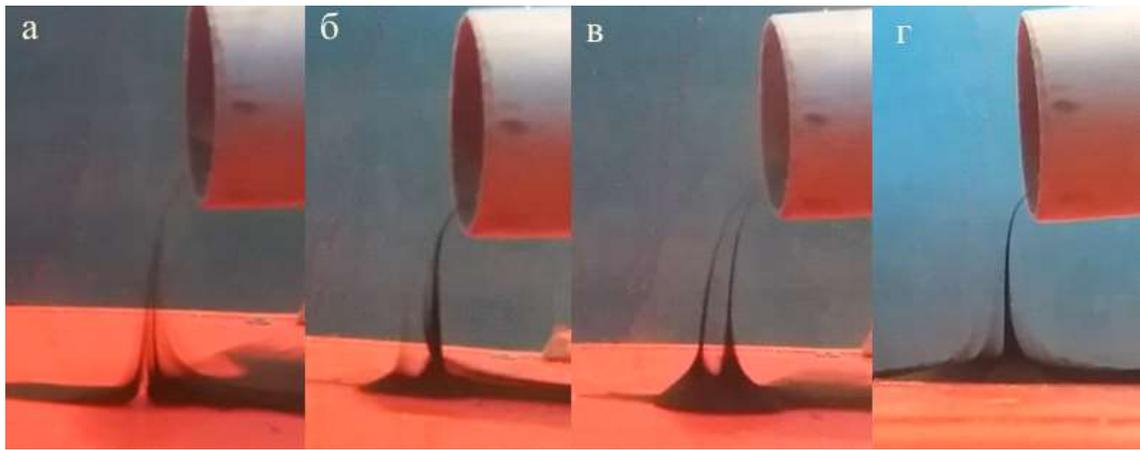


Рис. 8. Результаты эксперимента в водной среде: а – одиночный вихрь ($H = 1,2 D_{вз}$), б – вихрь кориолисовой силы ($H = 1,0 D_{вз}$); в – парные вихри ($H = 0,8 D_{вз}$); г – зарождение вихрей размытой интенсивности ($H = 0,6 D_{вз}$)

Экспериментальные исследования вихрей в воздушной среде проводились на установке для исследования вихрей кориолисовой силы (рис. 9).

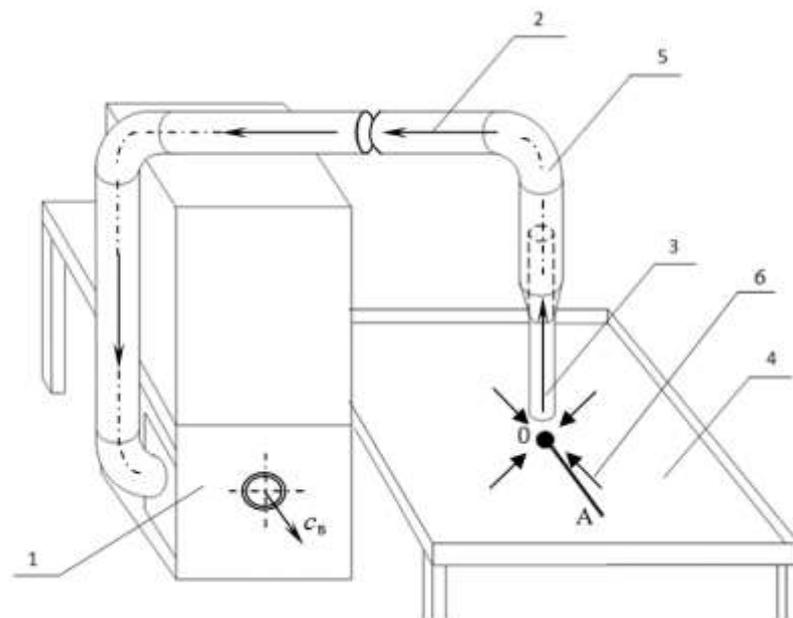


Рис. 9. Схема установки: 1- турбовоздуходувка с электродвигателем, 2 - воздуховод, 3 - воздухозаборник, 4 – экран, 5- поворотная часть, 6 – линия измерения тангенциальной скорости.

Для исключения большинства внешних воздействий на процесс экспериментального моделирования необходимо было:

– расположить экспериментальную установку в помещении, изолированном от окружающей среды (скорость воздуха внутри помещения близка к нулю, сохраняется постоянная температура);

– выбрать достаточно большой размер экрана, чтобы буртики на его краях не влияли на течение воздуха под воздухозаборником;

• выбрать расположение турбовоздуходувки 1 (рис. 9) относительно экрана 4 таким образом, чтобы поток воздуха c_b , выходящий из неё, не оказывал влияние на структуру течения под воздухозаборником.

Порядок проведения эксперимента:

- Устанавливаем модель ВЗ на определенную высоту над экраном.
- Включаем компрессор.
- На поверхность экрана вблизи точки мнимого стока подаем дым для визуализации ВО.
- Производим документирование результатов эксперимента.
- Повторяем пункты 2 – 4 для следующей высоты расположения модели ВЗ (модели подстилающей поверхности под ней).

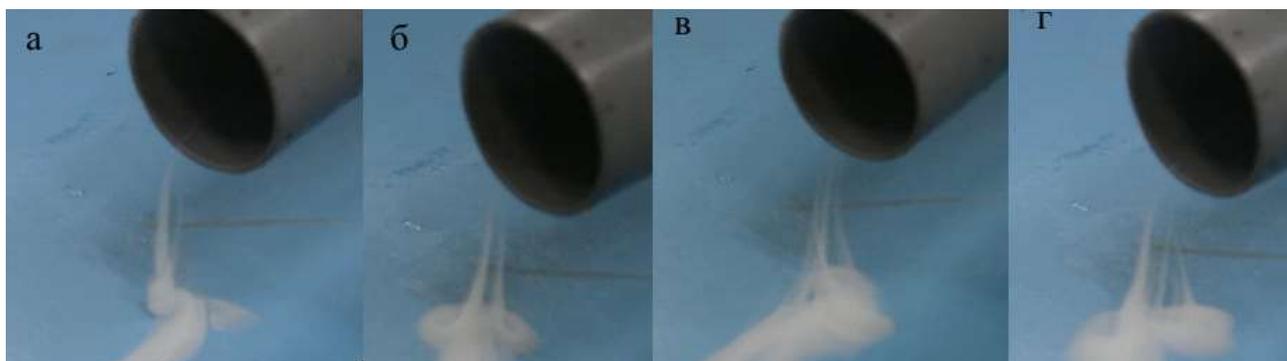


Рис.10. Результаты эксперимента в воздушной среде: а – вихрь кориолисовой силы ($H = 1,0 D_{ВЗ}$); б – парные вихри ($H = 0,8 D_{ВЗ}$); в – зарождение вихрей размытой интенсивности ($H = 0,6 D_{ВЗ}$); г – зарождение вихрей размытой интенсивности ($H = 0,4 D_{ВЗ}$)

Полученные результаты, проведенных экспериментов, наглядно демонстрируют процесс преобразования или конвертации вихря под воздухозаборником ВС, при изменении высоты последнего. Также выявленная закономерность последовательности переходов вихря ВЗ из одного типа в другой, действительна для любых воздухозаборников ВС, и является базой для дальнейшего экспериментального и математического моделирования данных газодинамических явлений.

Библиографический список

1. *Даниленко Н.В.* Теория вихрей перед воздухозаборниками самолетов при работе газотурбинных двигателей на аэродроме. Монография / Н.В. Даниленко, П.М. Кривель, С.В. Пахомов, А.М. Сафарбаков, М.М. Федотов. Изд. 2 (дополн.). ISBN 978-5-8038-0685-1. Иркутск: МГТУ ГА (Ирк. фак-т), 2011. 350 с.
2. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
3. Аэродинамика боевых летательных аппаратов и гидравлика их систем / под ред. М.И. Ништа. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1994, 570 с.
4. *Белоцерковский С.М.* Отрывное и безотрывное обтекание тел потоком идеальной несжимаемой жидкости / С.М. Белоцерковский, М.И. Ништ. М.: Наука, 1978, 352 с.

References

1. *Danilenko N.V. (2011).* The theory of vortices in front of the aircraft air intakes on operating the gas-turbine engines at the airdrome. Monograph / N.V. Danilenko, P.M. Krivel', S.V. Pahomov, A.M. Safarbakov, M.M. Fedotov. Ed. 2nd (add.). ISBN 978-5-8038-0685-1. Irkutsk: MSTU CA (Irk. Fac.), 2011. 350 p. (in Russian)
2. *Lojczanskij L.G.(1978).* Mechanics of fluids and gases. M.: Science, 1978. 736 p. (in Russian)
3. Aerodynamics of combat aircraft and hydraulics of their systems / ed. by M.I. Nisht. M.: Zhukovsky Air Force Engineering Academy, 1994, 570 p. (in Russian)
4. *Belocerkovskij S.M. (1978).* Separated and unseparated flow around the bodies by a stream of ideal incompressible fluid / S.M. Belocerkovskij, M.I. Nisht. M.: Science, 1978, 352 p. (in Russian)