2. *Дмитриевский А.А.* Внешняя баллистика / А.А. Дмитриевский, Л.Н. Лысенко, С.С. Богодистов. – М.: Машиностроение, 1991. − 640 с.

3. *Дмитриевский А.А.* Внешняя баллистика / А.А. Дмитриевский. – М.: Машиностроение, 1972. − 584 с.

4. *Коновалов А.А.* Внешняя баллистика / А.А. Коновалов, Ю.В. Николаев – М.: ЦНИИ информации, 1979. − 208 с.

5. *Игдалов И.М.* Ракета как объект управления / И.М. Игдалов, Л.Д. Кучма, Н.В. Поляков, Ю.Д. Шептун. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2004. – 544 с.

6. *Кувеко А.Е.* Внутренняя баллистика ствольных систем и ракетных двигателей твердого топлива / А.Е. Кувеко, Ф.П. Миропольский. – М.: ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского, 1987. – 312 с.

7. *Анипко О.Б.* Внутренняя баллистика ствольных систем при применении боеприпасов длительных сроков хранения / О.Б. Анипко, Ю.М. Бусяк. – Харьков: Изд-во академии внутр. войск МВД Украины, 2010. – 130 с.

8. *Анипко О.Б.* Модель массопереноса при хранении пороховых зарядов с учетом изменения температуры окружающей среды / О.Б. Анипко, И.Ю. Бирюков, Д.С. Баулин // Зб. наук. пр. ХУПС. − Харьков: ХУПС, 2006. – Вып. 2 (8). – С. 50 – 54.

Надійшла до редакції 18.09.20013 р.

УДК 532.13;519.6

О ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИМ РАСЧЕТАМ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС

В.Г. Выскребцов[1], к.т.н., доц., Л.Г. Корнейчук[1], к.ф.-м.н., В.А. Пухлий[2], д.т.н., проф.

[1]*Московский государственный технический университет «МАМИ»*
[2]*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности*

Проводится обоснование применения уравнений Навье-Стокса для осуществления аэрогидродинамических расчетов энергоблоков АЭС. Показывается неполнота уравнений Навье-Стокса в том смысле, что в них не учитывается кручение линий тока и соответственно вращательные движения жидкости.

Введение

В современной ядерной энергетике ведущими фирмами мира предлагаются пакеты программ компьютерных расчетов основных элементов энергоблоков АЭС. Как правило, это достаточно широко применяемые многоцелевые пакеты программ типа NASTRAN, ANSI, KATIA и др. В этих программах для динамического анализа механических систем используется метод конечных элементов [11].

Как правило, при расчетах гидроаэродинамических процессов в элементах оборудования используются уравнения Навье-Стокса. Между тем, к этому вопросу необходимо подходить весьма ответственно, поскольку, как показано в работе [9], на основе метода естественных координат в рамках дифференциальной геометрии была установлена неполнота уравнений Навье-Стокса в том смысле, что там не учитывается скручивание линий тока и соответственно вращательное движение жидкости.

Постановка цели и задачи научного исследования

Целью данной работы является обоснование применения уравнений Навье-Стокса для проведения аэрогидродинамических расчетов энергоблоков АЭС.

Для достижения поставленной цели производится детальный анализ уравнений Навье-Стокса в том смысле, что в них не учитывается кручение линий тока и соответственно вращательное движение жидкости. Обсуждаются пакеты прикладных программ для численной реализации.

Уравнения Навье-Стокса и их решение на основе пакетов вычислительных программ

Длительное отсутствие новых точных решений уравнений движения вязкой жидкости, то есть уравнений Навье-Стокса (после решений, описывающих течение Пуазейля в прямолинейных трубах и кольцевого течения Куэтта) в сочетании с практическими потребностями техники уже с конца сороковых годов прошлого века привело к появлению решений этих уравнений приближенными методами, прежде всего так называемыми сеточными. Вычисления в таких решениях выполнялись по существу вручную (на арифмометрах, у которых разрядные колеса приводились в движение рукояткой), сетка имела сравнительно небольшое число узлов, порядка, например, 10×10 расчетных точек. Для решения выбирались по возможности простые задачи, имеющие, однако, важное прикладное значение, например, задача об определении течения вязкой жидкости в так называемой каверне или прямоугольной полости. Эта задача интересна тем, что течение в каверне сопровождает течение в лабиринтном уплотнении, которое очень широко используется в гидравлических машинах. При этом наблюдалось достаточно качественное совпадение с опытом.

С пятидесятых годов прошлого века бурное развитие электроники и, соответственно, электронных вычислительных машин (ЭВМ), привело к увеличению скорости счета в миллионы раз. Это позволило, во-первых, увеличить число узлов расчетной сетки (например, стали применяться сетки вплоть до порядка 500×500) и, во-вторых, рассматривать пространственные течения.

Вместе с тем за истекшие более чем полвека не наблюдается прогресса в таких областях математики, как теории уравнений в частных производных, который бы позволил найти новые точные решения уравнений Навье-Стокса, которые сами по себе представляют собой запись одного из основных и проверенных для случая твердых тел астрономией законов Ньютона: масса, умноженная на ускорение, равна сумме внешних сил. Можно отметить, что трудности с решением уравнений Навье-Стокса обусловлены не только тем, что в них рассматриваются именно жидкие частицы, непрерывная среда, а не дискретные тела, а также тем, что не удается создать теорию дифференциальных уравнений в частных производных с нелинейными членами. Поэтому до сих пор не удается точно решить задачу, поставленную еще Ньютоном, о движении трех тел, хотя эта задача в настоящее время востребована и именно неопределенности и неточности при ее решении приближенными, в том числе и численными, методами обусловливают периодически появляющиеся «предсказания» о предстоящем падении на Землю того или иного метеорита и наступлении соответствующей всепланетной катастрофы. И это несмотря на то, что задача об устойчивости движения планет была решена еще Лапласом (с помощью использования разложения функций в гармонические ряды). Вывод Лапласа был категоричен: в ближайшее время около 1 млн лет Солнечная система устойчива.

Наряду с этим к настоящему времени накоплен достаточно большой опыт по использованию компьютеров в различных областях техники, например, инженерных расчетов на прочность заклепочных соединений в авиации, при проектировании тепло- и водоснабжения и др. Это обусловлено, по мнению авторов, тем, что при этих расчетах не решаются нелинейные дифференциальные уравнения, а также тем, что с самого начала в расчет вводятся приближенные величины, например, постоянный модуль упругости, коэффициент теплопроводности, коэффициент гидравлического сопротивления элемента сети и т.п. Тем не менее результаты подобных расчетов, выполненных для ограниченного круга задач и имеющих отличие от опытных значений в пределах инженерной погрешности $\pm$ 20 %, считаются обычно удовлетворительными.

Дешевизна и быстрота получения результата при применении инженерных расчетных методов на ЭВМ по сравнению с проведением экспериментальных работ подталкивают к их широкому использованию в разных приложениях. При этом программное обеспечение и численные методы (например, метод сеток или метод конечных элементов или их комбинации) начинает зависеть от области применения. В настоящее время невозможно сказать, какой из численных методов (и соответствующее программное обеспечение) лучше. Созданы так называемые пакеты программ, ориентированные на решение отдельных самых разных классов или типов задач. Например, программы для расчетов на прочность, для бухгалтерского учета и т.д.

В последнее время (10 – 20 лет) вместо составления программ на каком-либо алгоритмическом языке (например, Фортран или Паскаль) самим вычислителем широкое распространение получили готовые пакеты вычислительных программ для решения задач в области гидродинамики, тепломассообмена, прочности, электродинамики и т.п. для проведения инженерных расчетов. Среди них наиболее часто упоминаются такие, как MSC/NASTRAN, CFX, FLUENT, STAR-CD, LS-DYNA, ANSYS, ABAQUS, FlowVision, MSC/MARC, MAGMASOFT, SolidWorks и др. В этих программах используются как метод сеток, так и метод конечных элементов [11].

Сейчас в ядерной энергетике ведущими фирмами мира предлагаются пакеты программ компьютерных расчетов основных элементов энергоблоков АЭС. Как правило, это достаточно широко применяемые многоцелевые пакеты программ типа NASTRAN, ANSIS, KATIA и др. В этих программах для динамического анализа механических систем используется метод конечных элементов [11].

Как правило, при расчетах гидроаэродинамических процессов в элементах оборудования используются уравнения Навье-Стокса. Между тем, к этому вопросу необходимо подходить весьма ответственно, поскольку можно указать на неполноту уравнений Навье-Стокса в том смысле, что там не учитывается ряд наблюдаемых в действительности явлений, например, скручивание линий тока и соответственно вращательное движение жидкости [9].

Такое положение давно известно, так как при выводе уравнений Стокса используется несколько допущений, справедливость которых не очевидна и сама должна быть проверена соответствием следствий из этих допущений путем сравнения теоретических и опытных данных.

В качестве первого такого неочевидного допущения отметим, что при введении понятия давления в движущейся вязкой среде используется допущение, приводящееся в одном из популярных и переиздаваемых учебниках [1], что: «… в ньютоновской несжимаемой вязкой жидкости взятое с обратным знаком среднее арифметическое трех нормальных напряжений, приложенных к взаимно перпендикулярным площадкам в данной точке среды, представляет давление в этой точке…*P*». Высказанное предположение является дополнительной гипотезой к обобщенному закону Ньютона, так как, исходя из общих гидродинамических соображений, нельзя доказать, что определенная таким образом инвариантная скалярная величина *P* будет той самой термодинамической характеристикой жидкости или газа, которая, например в случае совершенного газа, будет связана с другими термодинамическими характеристиками (плотностью и температурой) формулой Клапейрона» [1].

В качестве другого далеко не бесспорного допущения, используемого при выводе уравнений равновесия частицы сплошной среды, является пренебрежение моментами внешних сил, скручивающими эту частицу. Поясним эту ситуацию словами другого достаточно авторитетного учебника [2]: «Предположим, что силы, приходящиеся на площадь *S*, статически эквивалентны силе *R*, приложенной к точке *Q*, и некоторой паре *G*. Если мы будем каким-то образом непрерывно уменьшать площадь *S*, оставляя все время точку *Q* внутри ее, то сила *R* и пара *G* будут стремиться к нулю, а направление силы – к некоторому предельному направлению (*l, m, n*). Мы предположим, что число *R/S*, полученное путем деления числа единиц силы в силе *R* на число единиц площади в площади *S*, стремится к нулю к некоторому пределу *F*, а отношение *G/S* стремится к нулю» [2].

Таким образом, отсюда следует, что при рассмотрении равновесия отдельной твердой частицы момент кручения от действия внешних сил и соответственно угловое ускорение, согласно теоретической механике, должно учитываться и учитывается, а вот при рассмотрении жидкой частицы – нет, не учитывается. Возможно, это обстоятельство может служить признаком того, что уравнения Стокса, как и уравнения теории упругости сплошной среды, могут описывать лишь незакрученные движения и поля напряжений, то есть только плоские и осесимметричные. Только сравнением теоретических, соответствующих точным решениям уравнений Стокса и фактических, физически наблюдаемых течений может быть определена справедливость вышеуказанных допущений.

Однако для этого должен быть накоплен достаточно обширный массив, так сказать эмпирическая «база данных» значений профилей скоростей течений, для того, чтобы можно было сравнить эмпирические профили скоростей с профилями, построенными согласно точным решениям уравнений Стокса.

Кроме того, необходимо учитывать и то обстоятельство, что уравнения Навье-Стокса, как предполагается, справедливы лишь для слоистых, ламинарных течений жидкостей. Строго говоря, область справедливости этих уравнений можно было бы определить, сравнивая теоретические и экспериментальные значения параметров течения (скорости, давления, траектории и т.д.). Однако, к сожалению, к настоящему времени имеются всего два принципиально различных вида ламинарных течений, которые имеют теоретически вычисленные на основании уравнений Навье-Стокса значения параметров и которые согласуются с данными опытов (в пределах ошибок измерений порядка $\pm$ 0,5 %), – это течения в силу своей уникальности именные, это течения Пуазейля и Куэтта.

Существенно еще и то, что программы счета в упомянутых пакетах опубликованы не полностью, или даже совсем не опубликованы, но в них могут содержаться (по опыту знакомства с некоторыми известными авторам вычислительными программами в докторских диссертациях) такие, на взгляд авторов, некорректные приемы программирования, как использование операторов типа «go to &», где & - один из начальных операторов программы для повтора вычислений и накопления ошибок округления вычисляемых величин (этот прием - один из методов увеличения так называемой «схемной вязкости» или «сеточной вязкости» и т.п.) для достижения сходимости вычислений и получения правдоподобного результата.

В результате сказанного результаты счета одной и той же задачи могут различаться многократно и даже приводить к фантастическим результатам (например, величине давления входного давления в цилиндр ДВС минус 0,3 атмосферы, это один из результатов вычислений при численной «оптимизации» коллектора автомобиля марки «Хонда». Поэтому полагаться только на результаты счета на любом пакете программ не целесообразно. Но приведенный пример можно оценивать, так сказать, как частный курьезный случай.

Более существенно то, что существующее на сегодня программное обеспечение не обращает внимания на некоторые известные типы течений. Например, не учитывает и не может учесть образование так называемых вихрей Гёртлера и их влияние на сопротивление движению вязкой жидкости (рис. 1).

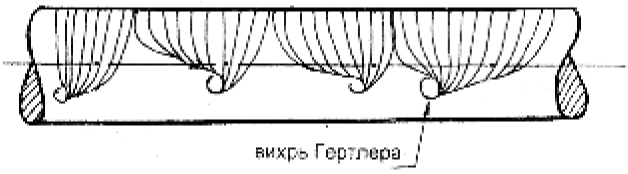

Рис. 1. Вихри Гёртлера, обнаруживаемые по отклонению шелковинок при продувке цилиндра в аэродинамической трубе. Зарисовка положения шелковинок, приклеенных на цилиндре. С фотографий опытов ЦАГИ [3]

А между тем вихри Гёртлера, существование которых обнаружено в 1940 г., образуются и при обтекании цилиндров (рис. 2), и в пространстве между вращающимися цилиндрами (вихри Тейлора-Гёртлера), и в ламинарных слоях, и на крыле самолета, и в других случаях (рис. 3). Их образование может приводить к кратному увеличению сопротивления движения. Другим примером того, что фактические, наблюдаемые движения не следуют из уравнений Навье-Стокса и не содержатся как результат их численного решения при применении любых известных на сегодня программ вычислений, могут служить наблюдения над движением шариков в воде, которое, видимо, каждый наблюдал в виде винтового движения поднимающихся воздушных пузырьков.

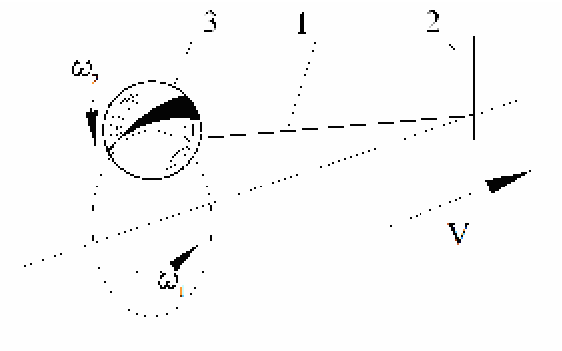

Рис. 2. Схема движения уединенного шара при его буксировке под водой с постоянной скоростью *V*: 2 – спица; 1 – нить; 3 – шар с раскрашенными на его поверхности участками для наблюдения за его вращением с угловой скоростью ω_2; ω_1 – угловая скорость движения шара по спиральной траектории [4]

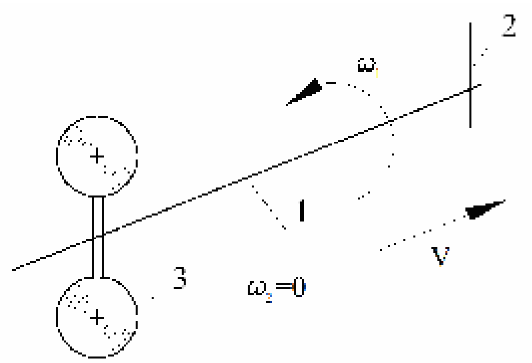

Рис. 3. Схема вращения с угловой скоростью ω_1 в воде «гантели» 3, образованной жестко соединенными двумя, тремя, четырьмя и т.д. шариками и буксируемой с постоянной скоростью *V* нитью 1, прикрепленной к поводку 2

Неожиданно в рассматриваемом явлении то, что направление угловой скорости вращения шариков, если смотреть на «гантель» сзади, «вдогон», - всегда против часовой стрелки, то есть левое. При этом направление устойчивого вращения «гантели» (см. рис. 3) не зависит от направления скорости поводка *2* с «юга на север» или с «севера на юг», с «востока на запад» или с «запада на восток» [4].

Но можно указать и на нестыковки в результатах расчетов при применении самых современных пакетов программ при вычислении так сказать «старой» задачи: траекторий движения жидкости в каверне. Укажем как на пример ненадежности чисто вычислительного подхода, на плоское течение в «яме» или «каверне». Это течение вызывает интерес около полувека вследствие того, что подобное течение вязкой жидкости имеет место в так называемых лабиринтных уплотнениях, широко встречающихся в технике. Вследствие отсутствия точного аналитического решения применяемые численные методы приводят, в зависимости от автора и метода, к различию количественных характеристик такого течения в несколько раз, а также и к качественным различиям. Так, например, траектории течения в каверне, согласно одним авторам, выходят за границы каверны, а согласно другим авторам, - нет. Можно также отметить, что со временем вычисляемые траектории течения в каверне меняются даже у одного и того же автора. Фактическое же течение жидкости в каверне имеет, согласно опытам одного из авторов данного сообщения, принципиально периодический характер, причем волнообразование на границе каверны и потока жидкости из щели имеет место уже при самых малых скоростях (при значениях числа Рейнольдса в щели, гораздо меньших, чем в круглой трубе). Кроме того, это течение в каверне имеет неплоскостный, пространственный характер. Другими словами, ряд опытов показывает, что строго плоского движения вязкой жидкости не наблюдается и образование вихрей Гёртлера при обтекании цилиндра – это один способов проявления, так сказать, «запрета» на плоский тип течения вязкой жидкости.

Траектории течения в каверне (и, соответственно, значения величины сопротивления в зазоре) отличаются не только у разных авторов, но даже у одного и того же автора в разные годы. Приведенные примеры на рис. 4, 5 достаточно ясно это подтверждают.

а)

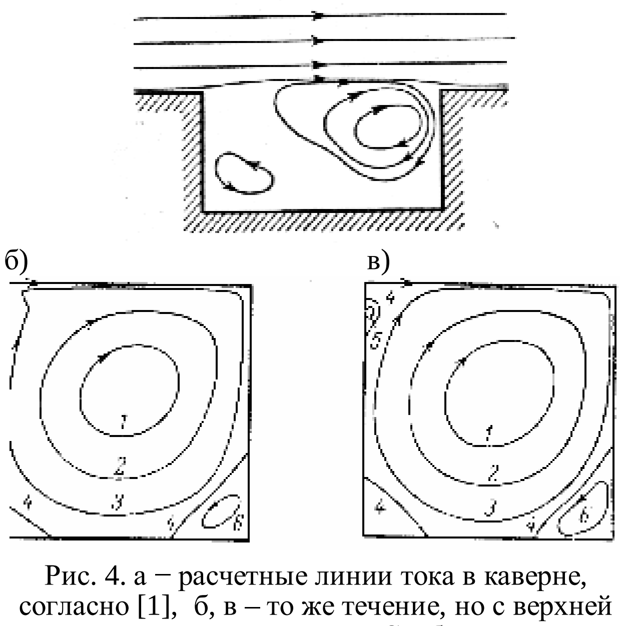

Рис. 4. а – расчетные линии тока в каверне, согласно [1], б, в – то же течение, но с верхней твердой подвижной стенкой. Свободное течение вверху каверны, аналогичное картине рис. 4, а, уже не рассматривается [6]

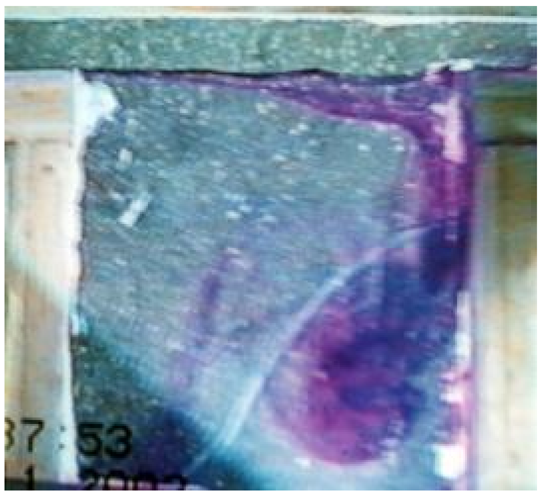

Рис. 5. Фотография подкрашенного потока, вытекающего из щели (вверху снимка) в прямоугольную каверну

Для сравнения приводится картина линий токов подкрашенной воды, полученной на модели. Ячейка модели имела размер примерно 9×9 см, ширину 5 см. Скорость течения воды в «щели» могла достигать 50 см/с.

На рис 5 колебания границы подкрашенного потока начинаются с самых малых скоростей при сохранении ламинарного режима движения в каверне. Усиление колебаний при увеличении скорости течения происходит вплоть до полной турбулизации течения. На снимке видно, что часть подкрашенного потока после контакта с вертикальной стенкой медленно опускается вниз. Скорости движения жидкости, находящейся ниже щели, на порядки меньше, чем в верхнем потоке.

Сравнение рис. 4 и рис. 5 показывает, что поведение потока в щели и каверне существенно сложнее, чем принято считать на основании численного решения. В действительности по длине потока могут сосуществовать одновременно как ламинарный, так и турбулентный режимы, установившееся и неустановившееся движения и т.д.

Можно отметить еще, что при численных расчетах трубопроводов не учитывается тот факт, что ламинарный режим течения при уменьшающемся диаметре (конфузор) вдоль по течению сохраняется, а при увеличивающемся (диффузор) переходит в турбулентный даже при малых числах Рейнольдса (рис. 6). Этот факт давно известен и отмечен в фундаментальных курсах по гидромеханике, хотя по неизвестным причинам не принимается во внимание [5]. Можно охарактеризовать данное изменение течения жидкости как зависимость от ускоренного или замедленного движения частиц жидкости.

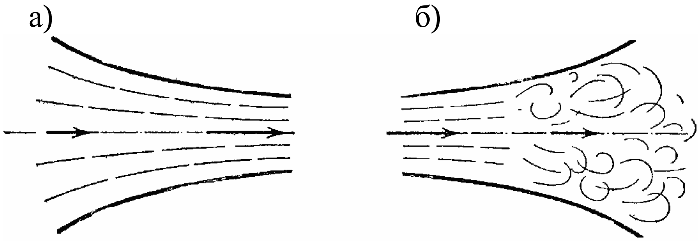

Рис. 6. Изменение характера течения вязкой жидкости при переходе от сужающегося трубопровода (а) – к расширяющемуся (б) и соответственно от ламинарного режима течения к турбулентному [5]

А между тем с каждым годом в области математической физики растет число так называемых приближенных решений задач на основе численного моделирования [6, 7, 8], которые в принципе не могут быть достаточно точными еще и вследствие так называемой «сеточной» или «схемной» вязкости, сопутствующей численным методам решения дифференциальных уравнений, особенно нелинейных и в частных производных. При этом никаких проблем не возникает, по мнению авторов, в связи с тем, что не проводится сравнения с опытами по причине отсутствия этих опытов.

Это иногда вызывает обоснованную обеспокоенность некоторых исследователей, что может быть выражено словами механика и вычислительного математика П. Роуча: «…математические проблемы существования и единственности решений уравнений в частных производных, описывающих течение жидкости, далеки от своего завершения как для самих дифференциальных уравнений, так и для их конечно-разностных аналогов» [7].

Фактическая замена натурных экспериментов так называемыми «численными экспериментами» приводит к тому, что результаты отдельных авторов физически невоспроизводимы и ненаблюдаемы. Как утверждает, например, программист Р. Темам:

«Из приводимых графиков ничего, кроме их самих, извлечь нельзя. Программы машинного счета, как правило, не публикуются, читатель лишь иногда видит алгоритм расчета» [8].

К сожалению, достаточно точных результатов наблюдений за течением жидкостей в ламинарном режиме со времен опытов Никурадзе и Шлифтинга не публикуется. Поэтому изложенное позволяет считать, что дальнейший прогресс в теории вязких сплошных сред лежит не в области использования каких-то особенных вычислительных программ, а лежит через создание экспериментальной «базы данных», то есть через накопление опытных характеристик гидравлических сетей и машин. Это самый надежный путь, не исключающий использование расчетных методов, то есть любого программного обеспечения. Здесь уместно добавить следующее.

Сформировавшийся со времен работ Галилея, Ньютона и других ученых «нового времени» (в отличие от средневековых алхимиков и астрологов) основной принцип понимания физической картины природы формулировался вкратце как: «практика – критерий истины». Этот принцип, казалось бы, навсегда заменил бытовавший все средневековье и ранее принцип согласия с авторитетами, прежде всего с Аристотелем. По существу этот принцип наблюдаемости означал, что гипотезы и теории, то есть теоретические модели явлений, должны формулироваться в терминах наблюдаемых в природе величин. Эксперимент и практика и только они решали окончательно, что верно, а что – нет.

Однако в последние десятилетия этот принцип, не отвергаемый открыто, все более отодвигается в сторону. Все большее число научных работ в области математической физики (практически – подавляющее большинство) в качестве своего единственного содержания имеют исключительно теоретические модели, «украшенные» достаточно сложным математическим аппаратом с применением вычислительной техники. Причем применение вычислительной техники в связи с ее сравнительной дешевизной и растущей доступностью все больше растет, захватывая новые области науки. При этом соответствие результатов с опытными данными даже не пытаются анализировать по причине, например, отсутствия данных о проведении таких опытов.

Невозможность, в том числе и с помощью самых современных ЭВМ, решить задачи математической физики приводит зачастую к желанию мистифицировать ситуацию [10]. Отмеченные факты требуют осторожности в применении результатов, полученных при применении пакетов программ с использованием уравнений Навье-Стокса.

Решение же уравнений типа уравнений Навье-Стокса с помощью дискретных численных методов (а именно они используются во всех пакетах программ) имеет, по мнению авторов, еще тот органический дефект, что дискретные численные методы на современном уровне их развития не учитывают и принципиально не могут учитывать то, что траектории движения физических объектов в силу непрерывности пространства не могут иметь неопределенно больших значений радиусов кривизны траекторий движения (и, соответственно, неопределенно больших ускорений), которые неизбежно присутствуют при использовании современных численных методов (численного моделирования решения таких уравнений, у которых по существу не известна сама возможность существования решения). При применении численных методов неизбежно рассмотрение траекторий движения, описываемых ломаными линиями, то есть предполагающими движение с ударами при скачкообразном изменении параметров движения независимо от величины этих скачков. В действительности же все имеющиеся опытные данные указывают на то, что такого рода скачков не наблюдается.

В пятидесятые и шестидесятые годы, на заре развития вычислительной техники и начала применения компьютеров (первый в мире компьютер был создан в США в 1946 году, второй электронной вычислительной машиной - так тогда назывались компьютеры

- был компьютер, созданный в СССР в 1949 году) высказывались мнения, что в будущем, по мере расширения применения компьютеров, поскольку основные законы природы уже открыты, компьютер будет представлять собой как бы настольную лабораторию. Эксперименты примут характер вычислений, станут «численными экспериментами».

На основании вышеизложенного можно сделать несколько выводов, первый из которых состоит в том, что широкое применение численных методов для решения задач математической физики в соответствии с фактическими тенденциями развития, несмотря на все вышеупомянутые недостатки, неизбежно будет расширяться вследствие своей доступности инженерно-техническим работникам.

Во-вторых, поскольку при решении задач, не требующих рассмотрения нелинейных зависимостей и высокой точности, численные методы не вызывают особых нареканий, применение поэтому для решения этих задач любого программного продукта обосновано и оправдано. Однако тотальное безоглядное использование ЭВМ для решения нелинейных задач с достаточно высокой точностью, задач в области исследовательской работы, по мнению авторов, нельзя приветствовать. Сначала должен быть накоплен достаточно обширный массив, так сказать эмпирическая «база данных» значений профилей скоростей течений для того, чтобы можно было сравнить эмпирические профили скоростей с профилями, построенными согласно точным решениям уравнений Стокса. И эти данные должны учитываться применяемой программой и пакетом программ, такими, например, как популярные в настоящее время ANSYS или NASTRAN.

Поэтому использование пакетов программ любого происхождения в области гидромеханики, аэромеханики, и др., по мнению авторов, должно сопровождаться экспериментальными работами (хотя выполнение этих работ на несколько порядков дороже и требует больше времени).

К сожалению, в настоящее время тенденция все более широкого применения программных продуктов не только в инженерных приложениях, но и при проведении исследовательских работ, все расширяется. Появляются все более «совершенные» пакеты программ без соответствующих уточнений особенностей обсчитываемых явлений. Происходят как бы вытеснение экспериментальных работ из общего объема исследовательских работ и замена их виртуальными.

Остается надеяться, что все-таки ситуация изменится, так как она тормозит развитие не только гидромеханики, но и, в более общем, развитие теории сплошных сред, в том числе в таких перспективных направлениях, как физика плазмы. Создавшееся положение работы исследователей в иллюзорном, мнимом пространстве «численного моделирования» противоестественно уже потому, что предполагает, что используемые уравнения уже содержат в себе все свойства изучаемого явления, чего не может быть, хотя бы потому, что непознанное бесконечно больше уже познанного. В области гидромеханики в настоящее время основное уравнение Навье-Стокса нельзя считать адекватной моделью реальных жидкостей (хотя более полного уравнения и нет).

Выводы

1. Широкое применение численных методов при решении задач математической физики будет расширяться при исследовании линейных задач.
2. Для нелинейных задач должен быть накоплен достаточно обширный массив экспериментальных данных. Применение пакетов программ любого происхождения в области аэрогидромеханики должно сопровождаться экспериментальными работами, несмотря на то, что выполнение этих работ на несколько порядков дороже и требует больше времени.

3. Отсутствие экспериментальных данных тормозит развитие не только гидроаэромеханики, но и общее развитие теории сплошных сред, в том числе в таких перспективных направлениях, как физика плазмы.

ПРО ЧИСЛОВЕ РОЗВ'ЯЗАННЯ РІВНЯНЬ НАВ'Є-СТОКСА СТОСОВНО ДО АЕРОГІДРОДИНАМІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС

В.Г. Вискребцов, Л.Г. Корнійчук, В.О. Пухлій

Проводиться обґрунтування використання рівнянь Нав'є-Стокса для аерогідродинамічних розрахунків енергоблоків АЕС. Показана неповнота рівнянь Нав'є-Стокса у тому розумінні, що в них не враховується кручення ліній струму і відповідно обертального руху рідини.

NUMERICAL SOLUTION of NAVIER-STOKES EQUATIONS with regard to AERO HYDRODYNAMIC CALCULATIONS OF NPP' POWER UNITS

V. Vyskrebzov, L. Kornejchuk, V. Puhly

The application of Navier-Stokes equations for the aero hydrodynamic calculation of NPP' power unit was substantiated. The exempted current lines torsion and accordingly rotary liquid motion were shown to be the Navier-Stokes equations' incompleteness.

Список использованных источников

1. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа: учебник для вузов. – 4-е изд., доп. и перераб. / Л.Г. Лойцянский. − М.: Наука, 1986. − 746 с.
2. *Ляв А.* Математическая теория упругости / А. Ляв. − М.-Л.: Наука, 1935. − 424 с.
3. *Короткин А.И.* О трехмерном характере обтекания кругового цилиндра / А.И. Короткин // Ученые записки ЦАГИ. − М.: ЦАГИ, 1973. − Т. IV. − № 4. − С. 17 - 18.
4. *Выскребцов В.Г.* Наблюдение новых явлений в картине течений вязкой жидкости / В.Г. Выскребцов // Известия «МАМИ». − М.: МГТУ «МАМИ», 2011. − № 1 (11). − С. 12 - 24.
5. *Фабрикант Н.Я.* Аэродинамика. Общий курс / Н.Я. Фабрикант. − М.: Наука, 1964. − 642 с.
6. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа: учеб. пособие для вузов. – 7-е изд. / Л.Г. Лойцянский. − М.: Дрофа, 2003. – 848 с.
7. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. − М.: Наука, 1980. – 328 с.
8. *Темам Р.* Уравнения Навье-Стокса. Теория и численный анализ / Р. Темам. − М.: Наука, 1986. – 382 с.
9. *Выскребцов В.Г.* Гидромеханика в новом изложении / В.Г. Выскребцов. − М.: Спутник+, 2001. − 262 с.
10. *Фейнман Р.* Фейнмановские лекции по физике. Физика сплошных сред / Р. Фейнман, Р. Лейтон, Н. Сэндс. − М.: Наука, 1966. − Т. 7. − 292 с.
11. *Пухлий В.А.* Численные методы. Теория и практикум в среде MATLAB: в 2-х т. / В.А. Пухлий. − Севастополь: Черкасский ЦНТИ. − Т. 1, 2007. – 412 с. − Т. 2, 2008. – 742 с.

Надійшла до редакції 12.08.2013 р.