

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ И ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

К.В. Беляев, А.С. Двинский, Д.А. Никулин, М.Х. Стрелец

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на характерное для последних лет исключительно быстрое развитие вычислительной техники и методов численного моделирования самых различных физических процессов и явлений, применение этих методов при решении прикладных задач, связанных с проектированием разного рода технических систем и оптимизацией технологических процессов, все еще остается весьма ограниченным. Это объясняется целым рядом объективных и субъективных причин, к числу которых следует прежде всего отнести вычислительную трудоемкость практических задач, связанную с геометрической сложностью и многообразием физических процессов, определяющих эффективность работы реальных систем, а также трудность освоения современных методов численного моделирования широким кругом инженеров-проектировщиков. В результате в проектно-конструкторской практике сегодня по-прежнему преобладают традиционные “инженерные” методы расчета, использование которых зачастую предписывается соответствующими отраслевыми нормативами. Хорошо известно, однако, что применимость таких методов ограничена простейшими типовыми объектами, для которых накоплен достаточно большой объем экспериментальных данных, необходимых для “калибровки” эмпирических констант и функций, входящих в соответствующие расчетные методики. Применительно к рассматриваемым в данной работе процессам вентиляции и кондиционирования помещений и

близким к ним по своей физической сути систем охлаждения электронной аппаратуры не менее важным недостатком инженерных методов является то, что они не дают практически никакой информации о локальных характеристиках этих процессов (полях скорости, температуры и концентрации примеси). В результате, даже в том случае, когда спроектированная на основе таких методов система в среднем удовлетворяет заложенным при проектировании требованиям, нет никакой гарантии, что она обеспечивает выполнение современных жестких санитарно-гигиенических норм по параметрам воздушной среды в отдельных частях вентилируемого помещения или по поддержанию температурного режима в отдельных элементах электронного прибора. В первую очередь это относится к специальным (нетиповым) объектам (стадионам, большим концертным залам, цехам заводов, “особо чистым” помещениям на фармацевтических и электронных производствах и в медицинских учреждениях, современным транспортным средствам, принципиально новым электронным приборам и т.д.). Применение стандартных инженерных методик расчета для таких объектов часто приводит к существенным ошибкам в оценке эффективности тех или иных конструктивных решений, а иногда и к качественно неверным выводам об их относительных преимуществах или недостатках, что в свою очередь, оборачиваются большими материальными потерями. В связи с этим, а также в связи с повышением требований к “климатическому комфорту” жилых и производственных помещений и к точности поддержания температурного режима в электронных приборах, несмотря на наличие отмеченных выше проблем, связанных с применением методов численного моделирования, они постепенно находят все большее практическое использование. В отличие от инженерных методов, они базируются на строгих фундаментальных законах гидродинамики и теплопереноса и позволяют получить детальную и достаточно точную количественную информацию о локальных характеристиках вентилируемых и/или охлаждаемых объектов в широком диапазоне изменения конструктивных

и режимных параметров. По крайней мере, в принципиальном плане, это открывает перед инженерами-проектировщиками совершенно новые возможности и, в конечном итоге, должно привести к чисто "компьютерному" проектированию соответствующих систем.

В настоящее время применение методов численного моделирования в рассматриваемой области, как и в других областях техники, опирается, главным образом, на использование так называемых коммерческих компьютерных программ Вычислительной Гидродинамики (в англоязычной литературе Computational Fluid Dynamics или CFD), представляющих собой "универсальные" вычислительные программы с многофункциональным графическим интерфейсом (пре- и пост- процессорами для ввода исходной информации и графической обработки полученных результатов). Коммерческие программы позволяют решать достаточно широкий круг прикладных задач гидродинамики и тепломассопереноса. Однако, естественной платой за универсальность таких программ является их сложность и, как следствие, длительность и высокая стоимость разработки. Это, в свою очередь, влечет за собой трудность усовершенствования и развития коммерческих CFD программ по мере появления новых численных методов и углубления физических представлений о рассматриваемых явлениях. Характерным примером в этом смысле является то, что вплоть до настоящего времени в подавляющем большинстве коммерческих CFD программ для расчета турбулентных течений используется $k-\varepsilon$ модель турбулентности, разработанная еще в 60-е годы или, в лучшем случае, ее более поздние модификации. Между тем, хорошо известно (см., например, [1]), что модели этой группы не обеспечивают необходимой для практики точности описания широкого круга пристенных турбулентных течений, и значительно уступают в этом отношении некоторым более поздним моделям (например, модели Spalart'a-Allmaras'a [2] Секундова [3] или Menter'a [4]).

Не менее важным недостатком универсальных коммерческих CFD программ является то, что в рамках таких программ крайне затруднено использование различных специальных методов и приемов, позволяющих существенно (иногда на порядки величин) сократить вычислительные затраты за счет учета тех или иных специфических особенностей рассматриваемых конкретных задач. Применительно к процессам вентиляции и охлаждения электронной аппаратуры к числу таких особенностей следует, например, отнести существенно дозвуковой характер течения, с одной стороны, и наличие значительных градиентов плотности, обусловленных неизотермичностью и/или пространственной неоднородностью полей концентраций, - с другой. Известно [5], что расчет таких течений в рамках полных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа сопряжен с серьезными вычислительными трудностями, а применение классического приближения Буссинеска, базирующегося на допущении о слабых изменениях плотности среды, может приводить к недопустимо большим погрешностям. Ясно, что при таких условиях более рациональным является использование модели гипозвуковых течений [5], ориентированной именно на расчет течений данного класса или применение специальных численных методов, разработанных для расчета медленных течений с сильно переменной плотностью [6]. Существенного уменьшения вычислительных затрат можно добиться также за счет учета геометрической специфики задач вентиляции и охлаждения электронной аппаратуры, в частности, того обстоятельства, что большинство объектов, встречающихся в таких задачах, при всем своем многообразии имеет форму прямоугольных параллелепипедов или близкую к ней. Это позволяет избежать необходимости использования неструктурированных сеток, без которых едва ли возможно создание программ, претендующих на описание произвольных геометрических объектов, и, тем самым, значительно сократить как затраты памяти, так и время решения задачи.

Приведенные соображения свидетельствуют о том, что, наряду с усовершенствованием существующих CFD программ общего назначения, необходимо создание специализированных программ, ориентированных на расчет тех или иных конкретных процессов и базирующиеся на математических моделях и вычислительных алгоритмах, учитывающих их особенности.

К сожалению, даже в рамках описанного выше “специализированного” подхода спектр физических процессов, которые необходимо описать при моделировании рассматриваемых в настоящей работе процессов вентиляции и кондиционирования помещений и охлаждения электронной аппаратуры, остается весьма широким. Он включает свободную вынужденную или смешанную конвекцию воздуха или смеси воздуха с газом-загрязнителем в свободной части помещения (электронного прибора), конвективный теплообмен между газовым потоком и внутренними элементами помещения (прибора), кондуктивный перенос тепла в твердых объектах, а также радиационный теплообмен между ними. При этом, вследствие большого числа произвольным образом расположенных внутренних объектов, для реальных систем характерно наличие зон рециркуляции, что делает невозможным применение относительно простых “параболических” моделей течения и конвективного теплообмена. Кроме того, крайне желательно, чтобы используемые вычислительные алгоритмы были применимы для расчета не только стационарных, но и нестационарных процессов. Это необходимо как для анализа запуска и остановки проектируемых систем и аварийных ситуаций, так и для расчета “номинально” стационарных процессов, в которых реализуются автоколебательные режимы, характерные для течений с обширными отрывными зонами и для некоторых струйных течений.

Таким образом, становится ясным, что чрезмерная специализация разрабатываемого программного продукта также вредна как и его чрезмерная универсальность, поскольку она влечет за собой неоправданное сужение области его применения. Иными словами, оптимальное решение задачи может

быть найдено лишь на основе разумного компромисса между полнотой математической модели, положенной в основу программы и ее вычислительной эффективностью.

В данной работе приводится краткое описание коммерческой программы “Coolit”, которая была разработана с учетом изложенных выше общих принципов и соображений в рамках научно-технического сотрудничества между Российским научным центром “Прикладная химия”, кафедрой гидроаэродинамики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета и научно-исследовательской фирмой Daat Research Corporation (США). Следует отметить, что опыт такого сотрудничества оказался достаточно успешным, и, в настоящее время, программа Coolit не только успешно конкурирует с такими известными во всем мире CFD программами как Flotherm и IcePak, но по многим параметрам превосходит их, что подтверждается, в частности, двумя престижными премиями, которыми был недавно отмечен Coolit (премия Конгресса США National Tibbetts Award (1999) и премия редакции журнала Control Engineering (2001) за лучший программный продукт года).

В первом разделе статьи представлено краткое описание комплекса математических моделей и вычислительных методов, положенных в основу Coolit, а во втором - приводится ряд примеров применения Coolit для решения задач кондиционирования помещений и охлаждения электронного оборудования.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ COOLIT

Для описания гидродинамики и тепломассопереноса в газовой фазе, то есть в свободном (не занятом внутренними объектами) объеме вентилируемых помещений или электронных приборов с воздушным охлаждением в Coolit используются полные трехмерные уравнения Навье-Стокса или Рейнольдса при

турбулентных режимах течения. В последнем случае для замыкания уравнений Рейнольдса используется модель турбулентности А.Н. Секундова с соавторами ν_t -92 [3], включающая одно дифференциальное уравнение переноса для турбулентной кинематической вязкости ν_t . Выбор именно этой модели обусловлен тем, что при своей относительной простоте она, как показано во многих исследованиях (см., например, [7]), существенно превосходит по точности другие, более сложные модели, в том числе, модели группы k - ϵ , которые, как уже отмечалось выше, используются в настоящее время в большинстве коммерческих CFD программ.

Наряду с воздушной средой, в задачах вентиляции и кондиционирования помещений и охлаждения электронной аппаратуры необходимо моделировать процессы тепломассопереноса в самых разнообразных внутренних объектах. Примерами таких объектов в вентилируемых помещениях могут служить воздухораспределительные устройства (“воздушные терминалы”), вентиляторы, нагревательные приборы, офисное и производственное оборудование, оконные и дверные проемы, разного рода устройства для удаления воздуха (смеси воздух - газ-загрязнитель) и т.п. В задачах охлаждения электронного оборудования наиболее типичными объектами являются микропроцессоры, блоки питания, электронные платы, на которых размещается большое количество мелких радиодеталей, провода и кабели, дисковые накопители, вентиляторы, входные и выходные отверстия в кожухе прибора Э предназначенные для подачи и удаления воздуха. Несмотря на все свое разнообразие, эти объекты могут быть объединены в несколько типичных групп, для каждой из которых строится соответствующая математическая модель, учитывающая специфические особенности данной группы. В рамках Coolit используется следующая классификация объектов вентилируемых помещений и электронной аппаратуры:

- *твердые поверхности, ограничивающие рассматриваемый объем* (стены,

потолок и пол помещения, кожух прибора);

- *проницаемые участки стен (кожуха)*, через которые воздух может втекать или вытекать из рассматриваемого помещения (прибора);

- *трехмерные твердые тела*;

- *плоские твердые тела (“пластины”)*;

- *трехмерные пористые тела*;

- *плоские пористые тела (“пористые пластины”)*;

- *вентиляторы* для нагнетания или удаления воздуха из помещения (прибора);

- *объемные и плоские источники (стоки) тепла*.

Хотя данная классификация, очевидно, не является исчерпывающей, она охватывает достаточно широкий круг реальных объектов и, что особенно важно, является достаточно гибкой, то есть, в зависимости от необходимой точности расчета, специфики рассматриваемой задачи и имеющихся в распоряжении пользователя вычислительных ресурсов, позволяет относить один и тот же реальный объект к различным типам. Например, электронные микросхемы имеют, как правило, сложную слоистую внутреннюю структуру. При расчете охлаждения отдельной такой микросхемы воздушным потоком можно рассматривать ее как набор трехмерных твердых тел с различными теплофизическими свойствами и объемными тепловыми источниками. В случае же расчета охлаждения компьютера в целом, с целью экономии вычислительных ресурсов та же микросхема может рассматриваться как пластина с шероховатой поверхностью, а выделяемое в ней тепло может быть задано с помощью плоского теплового источника.

Что касается геометрической формы внутренних объектов, то большинство из них может быть приближенно представлено в виде

совокупности прямоугольных параллелепипедов. В связи с этим в Coolit предполагается, что все моделируемые объекты имеют именно такую форму и расположены друг относительно друга таким образом, что их описание возможно на единой декартовой сетке. Это предположение является достаточно жестким и затрудняет анализ довольно широкого круга объектов. Однако отказ от него повлек бы за собой необходимость использования неструктурированных сеток (построение структурированной сетки приемлемого качества в многосвязной области произвольной геометрии практически возможно), что, в свою очередь, привело бы к существенному (на порядки) увеличению затрат оперативной памяти и повышению требований к быстродействию используемого компьютера. Кроме того, данное ограничение в значительной степени смягчается предоставляемой Coolit возможностью описания ряда типовых объектов “нестандартной” формы (треугольная призма, пирамида, сфера, цилиндр), которая обеспечивается за счет использования нестандартных ячеек конечно-объемной сетки на границах таких объектов.

Для описания процессов, протекающих в каждой из перечисленных выше групп объектов, используются соответствующие математические модели.

В частности, теплоперенос в "*трехмерных твердых телах*" описывается с помощью уравнений теплопроводности при наличии внутренних источников (стоков) тепла. Для описания процессов переноса импульса и тепла в "*пористых телах*" используется так называемая модель однотемпературной фильтрации (см., например, [8]), включающая уравнение неразрывности и уравнения переноса импульса и энергии. Тепловое состояние "*твердых пластин*" рассчитывается в предположении о том, что распределение температуры в них является локально одномерным. При этом для упрощения расчета динамического и теплового взаимодействия воздушного потока с пластиной предполагается, что она является бесконечно тонким "двухсторонним" объектом с различными температурами поверхностей. Математическая модель *вентилятора* базируется на предположении о том, что

скорость создаваемого им воздушного потока определяется локальным перепадом давления в рассматриваемой точке плоскости вентилятора и может быть рассчитана с помощью так называемой "вентиляционной кривой", которая обычно входит в комплект технической документации на вентилятор. При этом перепад давления определяется в процессе глобального расчета поля течения в рамках уравнений Навье-Стокса (на этом этапе вентилятор рассматривается как "пассивный" плоский объект).

Для описания теплового взаимодействия воздушного потока с внутренними объектами в Coolit используется сопряженная постановка задачи, то есть условия непрерывности температуры, концентрации примеси и тепловых и диффузионных потоков на границах соответствующих объектов. При этом радиационный теплообмен между внутренними объектами описывается в предположении о том, что воздушная среда прозрачна для теплового излучения.

Теплообмен между *твердыми поверхностями, ограничивающими рассматриваемый объем*, с окружающей средой в зависимости от конкретных условий моделируется заданием соответствующих (первого, второго или третьего рода) граничных условий к уравнению энергии на этих *твердых поверхностях*.

Граничные условия на *проницаемых участках* рассматриваемого объема зависят от того являются ли они входными или выходными, то есть от того, как направлена скорость потока на этих участках. В частности, предполагается, что на входных участках (скорость направлена внутрь рассматриваемого объема) разность давлений в рассматриваемой точке и в окружающем пространстве определяются уравнением Бернулли, а температура равна температуре в окружающей среде. На выходных участках границы (скорость направлена из рассматриваемого объема в окружающую среду) используются так называемые "мягкие" граничные условия (экстраполяция из внутренних точек на границу) для всех искомых величин, а давление полагается равным его значению в

окружающей среде. При этом тип *проницаемых участков* (“вход” или “выход”) определяется в процессе расчета автоматически.

Для численной реализации кратко описанных выше математических моделей разработан вычислительный алгоритм, в основе которого лежит неявная конечно-объемная схема дискретизации исходных дифференциальных уравнений. Пространственная аппроксимация отдельных членов уравнений производится на так называемой MAC-сетке (скалярные переменные определяются в центрах ячеек, а компоненты вектора скорости – на соответствующих гранях ячеек). Конвективные члены уравнений аппроксимируются противопоточными разностями, а вязкие – центральными разностями второго порядка. Полученные в результате дискретные аналоги исходных уравнений Навье-Стокса решаются с использованием так называемого проекционного метода [9], а уравнения переноса тепла (массы примеси) с помощью метода бисопряженных градиентов [10]. При решении уравнений Навье-Стокса на первом (предикторном) шаге определяется предварительное поле скорости (на этом этапе используется неявная схема приближенной факторизации, а градиент давления определяется по полю давления на предыдущем временном шаге). На втором (проекционном) шаге решается уравнение Пуассона для поправки давления (при этом, как и при решении уравнения теплопереноса, используется метод сопряженных градиентов [10]), после чего находится новое поле давления и поле скорости, удовлетворяющее уравнению неразрывности.

Завершая краткое описание вычислительных алгоритмов, используемых в Coolit, следует подчеркнуть, их важную особенность, связанную с необходимостью решения задач теплообмена в сопряженной постановке. Она состоит в том, что в реальных системах различие характерных времен теплопереноса в различных объектах составляет как правило несколько порядков величины. Например, различие характерных времен кондуктивного теплопереноса в контактирующих между собой твердых телах может достигать

трех порядков (медь-керамика), а при теплообмене между воздушным потоком и твердым металлическим телом - еще больших значений. Как показывал опыт, при таких условиях традиционный (“зонный”) подход к решению сопряженных задач (последовательный расчет параметров в отдельных подобластях), требующий явной (по времени) аппроксимации граничных условий сопряжения, оказывается, по существу, неработоспособным (приводит к значительному снижению устойчивости и замедлению или даже отсутствию сходимости используемых итерационных алгоритмов). В связи с этим в Coolit применяется другой подход к решению сопряженных задач, основанный на сквозном расчете параметров во всей расчетной области. Иными словами, несмотря на то, что в отдельных подобластях для описания процессов переноса используются различные дифференциальные уравнения, вся область рассматривается как единое целое, а условия сопряжения на границах подобластей используются при конечно-объемной аппроксимации законов сохранения массы, импульса и тепла в приграничных ячейках отдельных объектов. В сочетании с упомянутым выше методом сопряженных градиентов, это позволяет полностью исключить трудности, связанные с последовательным решением соответствующих задач в отдельных подобластях.

3. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ COOLIT

Как уже отмечалось, в настоящее время Coolit достаточно широко используется различными компаниями США и Западной Европы (список пользователей Coolit можно найти на сайте компании Daat Research Corporation, www.daat.com). Благодаря этому, накоплен значительный опыт решения с его помощью самых разнообразных прикладных задач. К сожалению, в силу ограниченности объема статьи, мы можем привести здесь только несколько чисто иллюстративных примеров, позволяющих судить лишь о некоторых возможностях данной программы.

Первый пример относится к проектированию систем вентиляции и

кондиционирования помещений. Важную роль при создании таких систем играет выбор конструкции воздушного терминала, во многом определяющей эффективность системы в целом и скорость движения воздуха в рабочей/жилой зоне помещения. На рис.1 схематически представлена одна из перспективных конструкций воздушных терминалов, предложенная в работе [11] и, судя по имеющимся экспериментальным данным, обладающая существенными преимуществами перед традиционными способами подачи воздуха в вентилируемые помещения. Данная конструкция отличается тем, что воздух подается на вход в терминал в виде двух встречных струй, показанных стрелками на рис.1, и лишь затем образующийся в результате взаимодействия этих струй поток через входное отверстие, показанное на рисунке белым цветом, попадает в вентилируемое помещение.

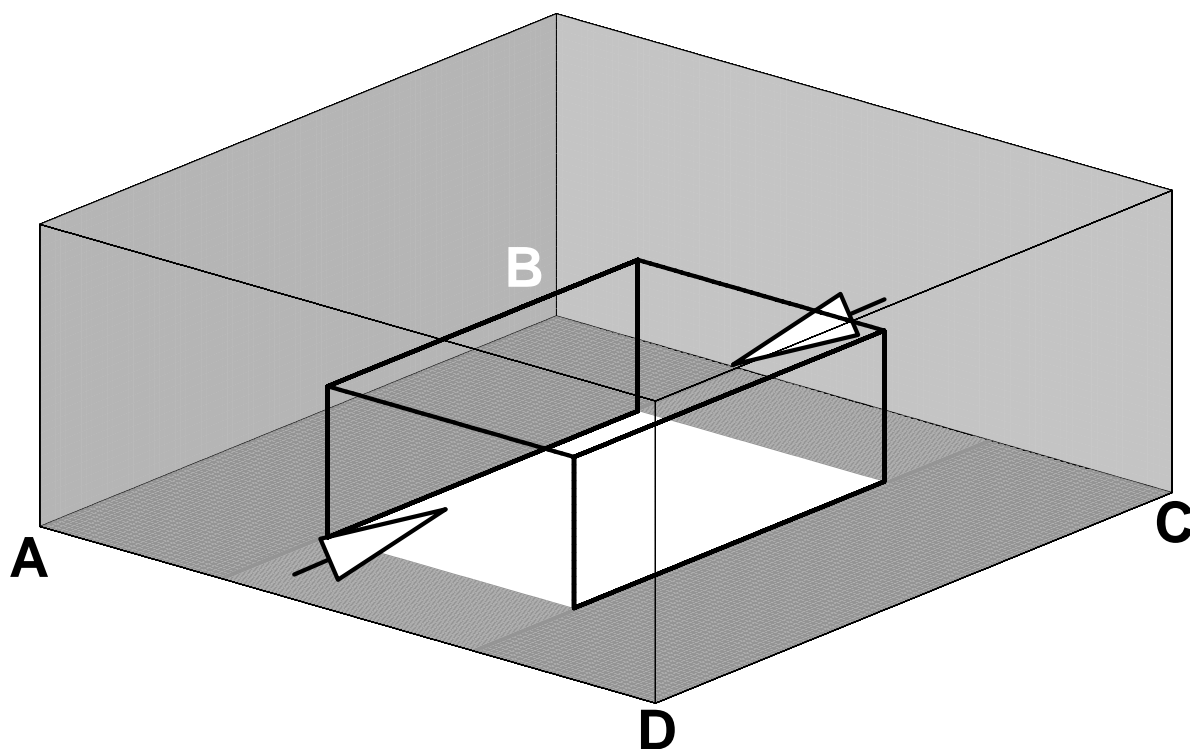


Рис. 1. Схема воздушного терминала, основанного на концепции «встречных струй»

Визуализация потоков, создаваемых терминалами такого типа, показала [11], что они имеют нестационарный характер и сложную трехмерную пространственную структуру, что, в конечном итоге, и определяет высокую эффективность данной конструкции. Ясно, однако, что конкретные режимные и геометрические параметры терминала, обеспечивающие его максимальную эффективность, существенным образом зависят от формы и размеров рассматриваемого помещения и находящегося в нем оборудования и могут быть определены только с помощью предварительных расчетов различных вариантов конструкции.

Рисунки 2, 3 иллюстрируют возможности, открываемые в этом смысле программой Coolit. Во-первых, выполненные с ее помощью расчеты позволили понять механизм возникновения автоколебаний при использовании данной конструкции терминала. Он связан с поочередным “запиранием” одного из входных отверстий терминала нестационарным вихрем, образующемся при взаимодействии встречных струй, в результате чего, воздух поочередно поступает в терминал то через правое, то через левое отверстие, что собственно и является причиной автоколебаний потока в помещении. Структуру возникающего при этом среднего движения воздуха иллюстрирует изоповерхность осредненного по периоду автоколебаний модуля скорости, изображенная на рис.2. Что касается основных характеристик автоколебаний (их периода и амплитуды) и влияния на них конструктивных параметров терминала, то об этом можно судить по рис.3, на котором представлены зависимости от времени вертикальной составляющей скорости в одной из точек расположенного в центре потолка входного отверстия при различных значениях продольного размера терминала. Возвращаясь в этой связи к оценке инженерных методов расчета, высказанной во Введении, следует подчеркнуть, что получение с их помощью такого рода информации в принципе невозможно.

Два следующих примера применения Coolit относятся к задачам охлаждения

электронной аппаратуры.

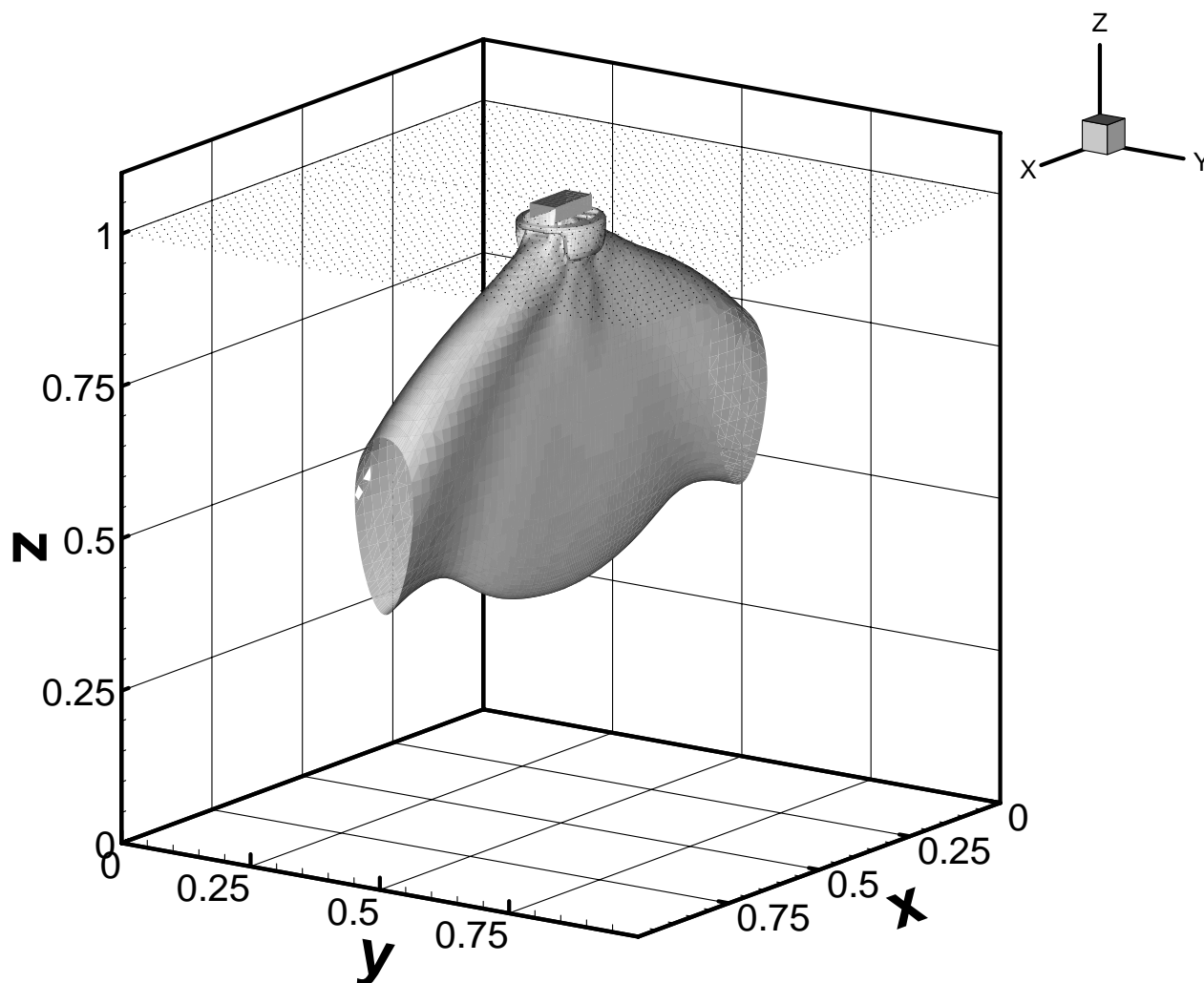


Рис. 2. Исоповерхность осредненного во времени модуля скорости $V = 0,4$ м/с

Первый из них имеет чисто методический характер и иллюстрирует высокую вычислительную эффективность используемого в Coolit “сквозного” метода расчета сопряженного теплообмена, о которой говорилось выше. Для ее оценки был проведен расчет ламинарной естественной конвекции у вертикальной пластины конечной толщины с поверхностными источниками тепла, экспериментально исследовавшейся в работе [12]. Схема экспериментов представлена на рис 4. Они проводились с использованием пластин, изготовленных из стекла и керамики. При этом отношение теплопроводностей материала пластины и окружающей их среды составляло 40 и 1100 соответственно. Несмотря на это, при решении данной задачи с помощью Coolit

не наблюдается никаких вычислительных проблем, что является убедительным подтверждением высокой эффективности используемого численного алгоритма при решении сложных сопряженных задач теплообмена. Следует также обратить внимание на хорошее согласование результатов расчетов с экспериментом (см. рис 5), свидетельствующее об адекватности используемого в Coolit комплекса математических моделей.

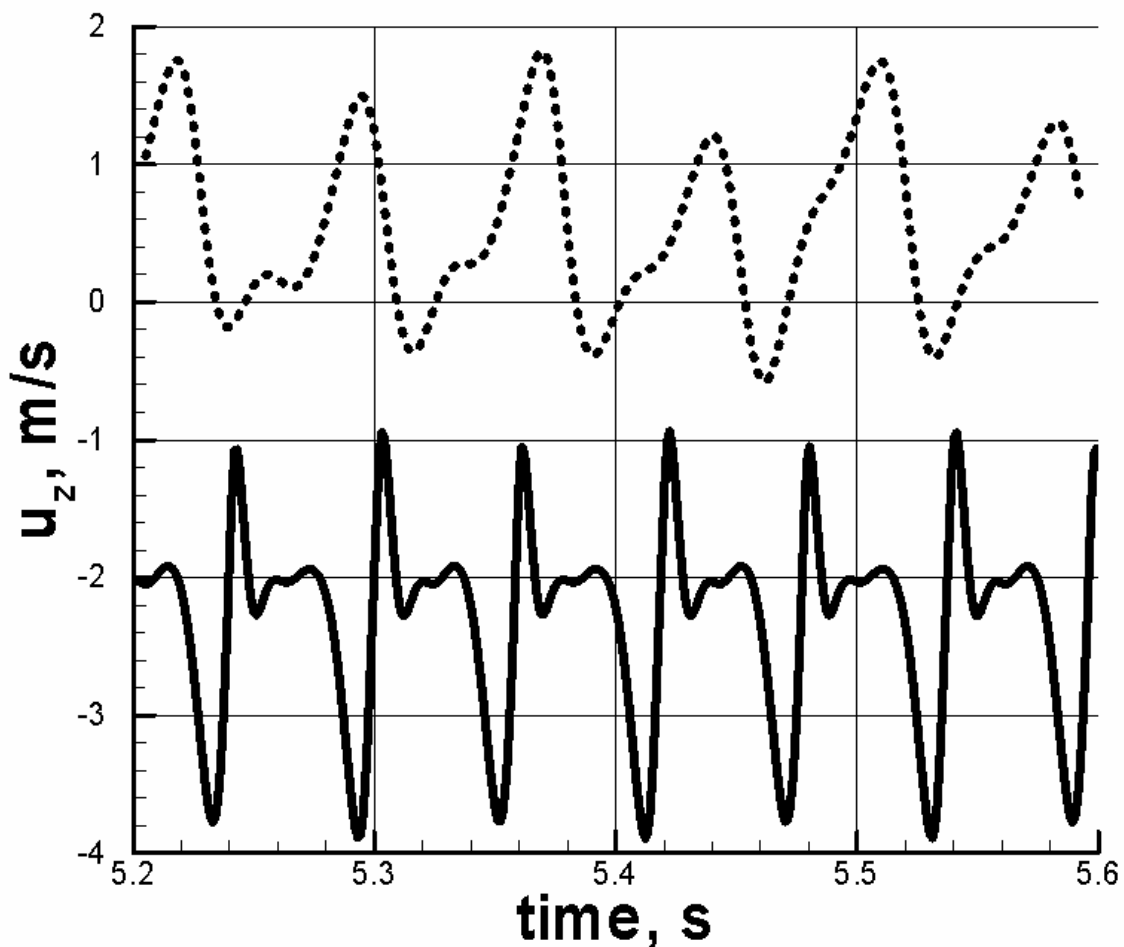


Рис. 3. Зависимость вертикальной составляющей скорости от времени в одной из точек входного отверстия при различных значениях продольного размера терминала

Последний пример иллюстрирует уровень сложности задач, которые позволяет решать Coolit. На рис.6 представлено рассчитанное с его помощью поле скорости и распределение температуры по поверхности отдельных элементов аппаратного блока телекоммуникационного прибора. Размеры блока

составляют $0.48 \times 0.088 \times 0.45 \text{ м}^3$.

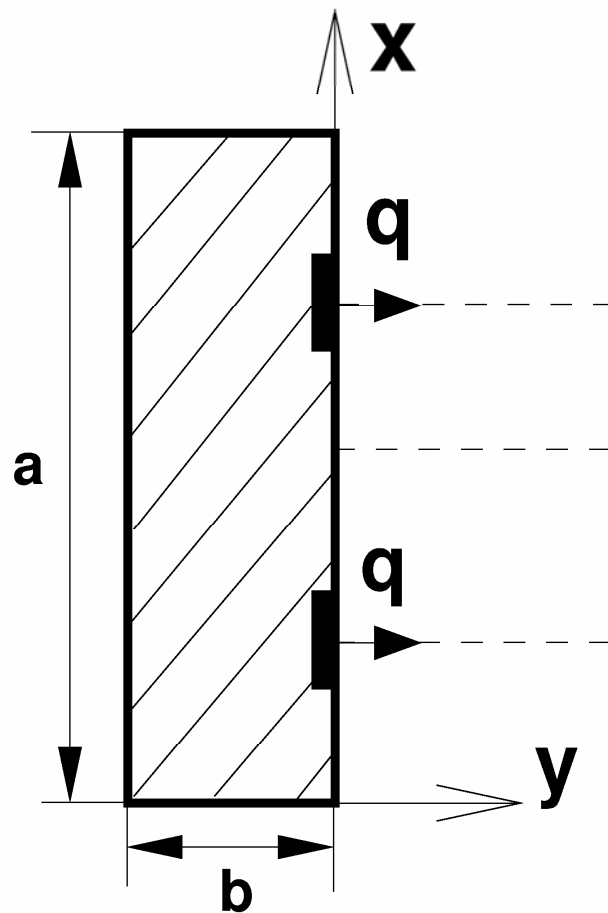


Рис. 4. Схема задачи (a – длина, b – толщина пластины, q – тепловой поток)

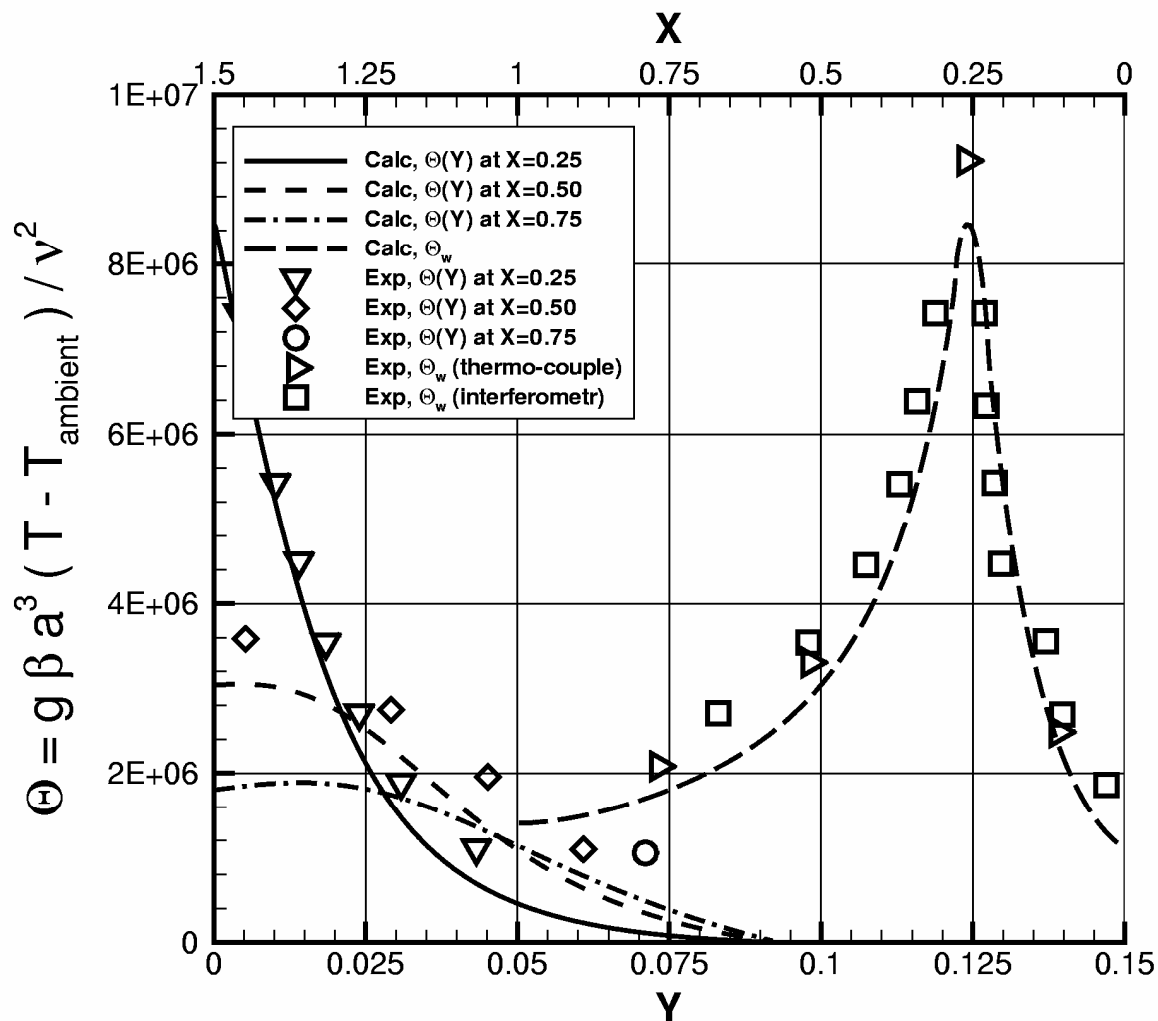


Рис. 5. Распределение температуры в потоке и на поверхности стеклянной пластины с включенным нижним нагревателем.

Он содержит два процессора, многочисленные электронные платы, диоды, теплоотводящие элементы и источник питания (всего около 1500 внутренних объектов). Блок потребляет 158.5 ватт электроэнергии и охлаждается тремя вентиляторами с суммарным расходом $0.017\text{м}^3/\text{с}$. Время решения данной задачи на PC P3-1288MHz составило около восьми часов. Очевидно, что такая “производительность” позволяет проводить серийные расчеты, необходимые для определения параметров вентиляторов и оптимального с точки зрения поддержания заданного температурного режима размещения отдельных

элементов внутри исключительно сложных электротехнических приборов. Тем самым исключается необходимость создания и испытаний многочисленных прототипов новых приборов, что очевидно существенно снижает сроки и стоимость их разработки.

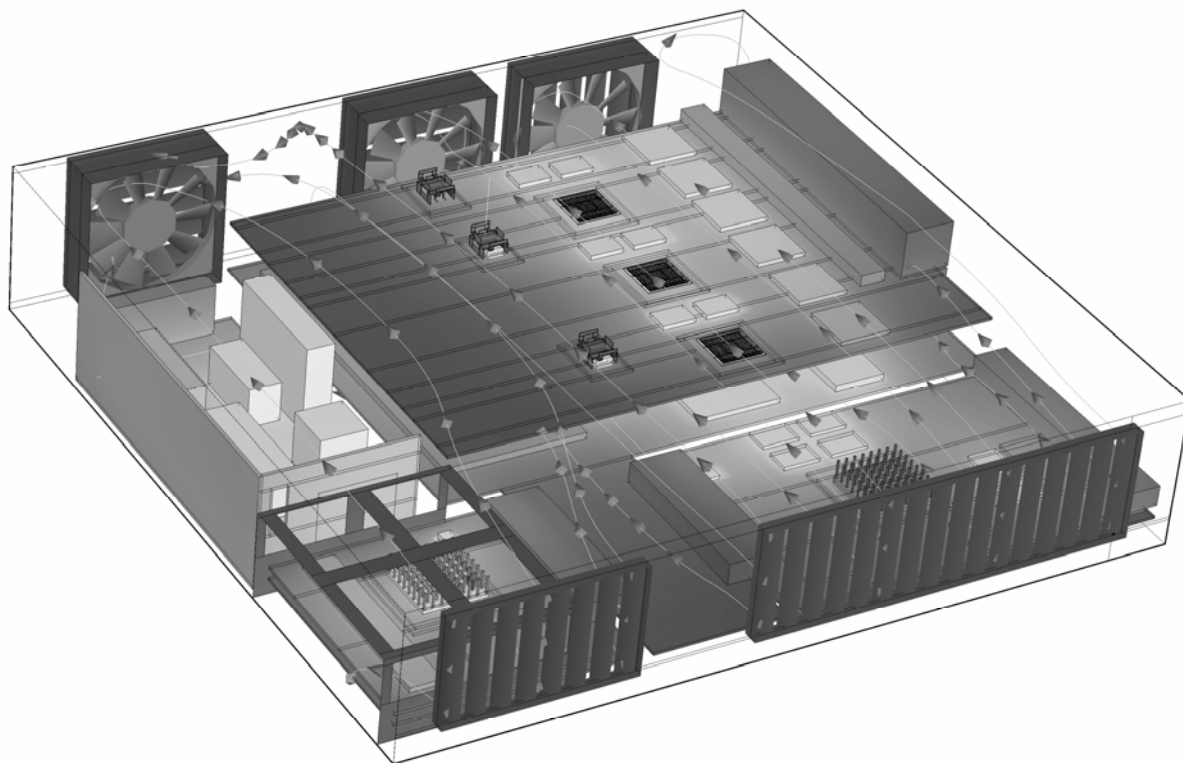


Рис. 6. Траектории движения невесомых частиц и поле температуры на поверхности внутренних элементов телекоммуникационного прибора.

Приведенные примеры достаточно убедительно демонстрируют широкие возможности, открываемые программой Coolit перед конструкторами систем вентиляции и охлаждения электронных приборов и подтверждают правильность кратко описанной во Введении концепции создания специализированных CFD программ, предназначенных для решения тех или иных классов прикладных задач гидродинамики и тепломассопереноса.

Список литературы

1. Davidson L., Second-Order Correction of the k - ε Model to Account for Non-Isotropic Effects Due to Buoyancy// Int. J. Heat Mass Transfer. 1990. V.33.№ 12. P2599.
2. Spalart P.R., Allmaras S.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows// La Rech. Aerospaciale. 1994. №1. P.5.
3. Gulyaev A.N., Kozlov V.E., Secundov A.N., A Universal One-Equation Model for Turbulent Viscosity// Fluid Dynamics. 1993. № 4. pp. 485-494.
4. Menter F.R. Zonal two-equation k - ω turbulence models for aerodynamic flows// AIAA Paper. 1993. AIAA 1993 – 2906.
5. Лапин Ю.В., Стрелец М.Х., Внутренние течения газовых смесей. - М., Наука, 1989.
6. Briley W.R., McDonald H, Shamroth S.J., A low Mach number Euler formulation and application to time-iterative LBI schemes// AIAA J. 1983. V.21. №10. pp. 1467--1469.
7. Shur, M., Strelets, L., Zaikov, A., Gulyaev, V., Kozlov, A.Secundov., Comparative Numerical Testing of One- and Two-Equation Turbulence Models for Flows with Separation and Reattachment// AIAA Paper. 1995. AIAA1995-0863.
8. Bear J., Dynamics of fluids in porous media, American Elsevier publishing Co. Inc., NY, 1972.
9. Peyret R., Taylor D.T., Computational Methods for Fluid Flow. Springer – Verlag -NY, 1983.
10. Kershaw D.S., The Incomplete Cholesky-Conjugate Method for the Iterative Solution of Systems of Linear Equations// Journal of Computational Physics. 1978. V. 26. pp. 43-65.
11. Авдеева Т.П., Коузов. П.А., Аэродинамические характеристики лункообразных приточных выпусков: Совершенствование условий и охраны труда, - Профиздат, 1980.

12. Зиннис А.Е., Решение сопряженной задачи о температурном поле в вертикальной плоской пластине и ламинарной естественной конвекции при произвольном распределении плотности теплового потока на поверхности пластины// Теплопередача, Труды американского общества инженеров – механиков. 1970. № 3, стр. 220-228.