

УДК 533.607.14

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИПЕРБОЛОИДА ВРАЩЕНИЯ С ЮБКОЙ ПРИ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

В.И. ЗВЕГИНЦЕВ¹, А.М. ХАРИТОНОВ¹, В.Ф. ЧИРКАШЕНКО¹, С.В. ЧИБИСОВ¹,
Д. ФЛЕТЧЕР², С. ПАРИС²

¹*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

²*Институт аэродинамики им. Кармана, Бельгия*

Представлены результаты испытаний в новой гиперзвуковой аэродинамической трубе адиабатического сжатия АТ-303 ИТПМ СО РАН модели гиперболоид вращения с юбкой при $M_\infty = 10$ и 15 в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Распределения давлений и тепловых потоков по длине модели сравниваются с данными, ранее полученными в различных европейских гиперзвуковых аэродинамических трубах (Longshot — Бельгия, HEG — Германия), и с результатами численных расчетов. Показано удовлетворительное качественное согласование результатов измерений коэффициентов давлений и тепловых потоков в безотрывной области течения. Обсуждаются причины расхождения результатов, которые проявляются в измерениях области отрыва и присоединения потока.

Демонстрируется существенное влияние эффектов вязкости на характеристики обтекания модели и особенно — на распределение тепловых потоков, что подтверждает важность моделирования натуральных чисел Рейнольдса при испытаниях в аэродинамических трубах моделей ВКС (воздушно-космический самолет).

ВВЕДЕНИЕ

Гиперзвуковая аэродинамическая труба АТ-303, созданная согласно концепции [1] для моделирования натуральных чисел Рейнольдса, реализуемых при полете воздушно-космических летательных аппаратов, в 1999 году, введена в эксплуатацию. К настоящему времени наряду с весовыми измерениями в этой трубе проведены исследования полей скоростей и тепловых потоков а также испытания эталонных моделей в широком диапазоне чисел Маха и Рейнольдса. В частности, для верификации характеристик качества потока и точности измерительного комплекса АТ-303, а также для определения влияния вязких эффектов на характеристики обтекания проведены испытания модели гиперболоид вращения с юбкой HF (Hyperboloid Flare). Характерной особенностью обтекания этой модели является формирование области отрывного течения, параметры потока в которой существенно зависят от чисел M и Re набегающего потока. В связи с этим получение достоверных экспериментальных данных при числах Re , близких к натурным, в широком диапазоне чисел M необходимо для понимания процесса формирования таких течений и, соответственно, совершенствования методов их расчета.

Модель HF с юбкой в начале 90-х годов испытывалась в различных гиперзвуковых аэродинамических трубах (Longshot — Бельгия, HEG — Германия, F4 — Франция). Результаты измерений, полученные в АТ-303, сравниваются с опубликованными данными [2, 3, 4].

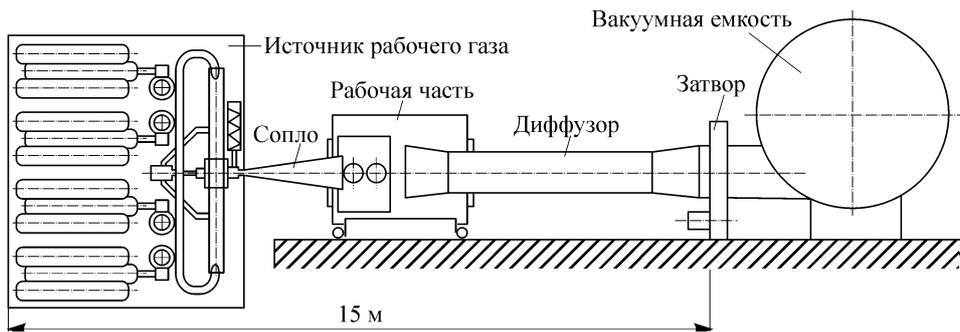


Рис. 1. Структурная схема аэродинамической трубы АТ-303

Технические характеристики			
Диаметр сопла, D , мм,	300–600	Число Маха, M ,	8–20
Объем форкамеры, дм^3 ,	6	Число Рейнольдса, Re_D ,	10^6 – 10^7
Давление в форкамере, атм.,	3000	Время рабочего режима t , с,	0,04–0,2
Температура в форкамере, К,	до 2500	Рабочий газ.	азот, воздух

МОДЕЛЬ И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 представлена структурная схема аэродинамической трубы адиабатического сжатия АТ-303 и ее основные характеристики. Основным элементом данной аэродинамической трубы — источник рабочего газа — является совместной разработкой ученых Института гидродинамики (ИГД) им. Лаврентьева и Конструкторско-технологического отдела Института гидроимпульсной техники Сибирского отделения РАН.

Предварительно сжатый и нагретый газ в форкамере аэродинамической трубы адиабатически дожимается до высоких параметров торможения с помощью симметрично расположенных мультипликаторов давления. Движение поршней обеспечивается двухступенчатым пневмогидравлическим приводом. После открытия соплового затвора газ через сопло истекает в рабочую часть, где формируется квазистационарный рабочий поток.

Эксперименты проводились с использованием воздуха в качестве рабочего газа при диаметре среза сопла 300 мм. Для увеличения продолжительности режима при моделировании низких чисел Re использовалась двойная форкамера. Параметры потока на срезе сопла определялись по алгоритму, реализованному в виде программы, разработанному М.Е. Топчиным (ИГД СО РАН).

Конфигурация модели НФ при нулевом угле атаки является осесимметричным вариантом представления наветренной поверхности в продольной плоскости симметрии летательного аппарата Гермес,

расположенной под углом атаки 30° при отклоненном управляющем щитке на 20° . Подробное описание модели приведено в работе [3].

Модель (рис. 2), предоставленная для исследований VKI (Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium), представляет собой гиперлоид вращения, сопрягающийся по линии излома с конической юбкой, угол полураствора которой составляет $\beta_k = 43,6^\circ$. При этом длина юбки

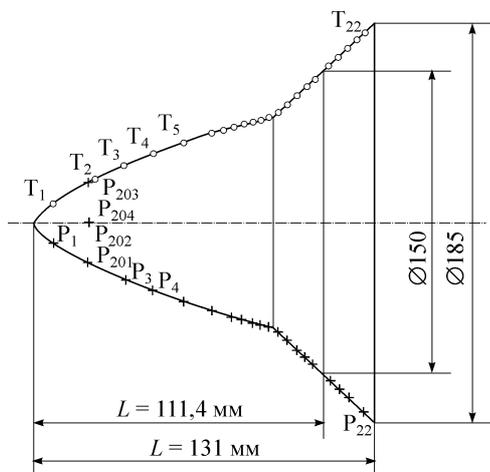


Рис. 2. Схемы моделей НФ с короткой и длинной юбкой.

могла изменяться путем отстыковки половины конической части модели. Вдоль одной образующей модели с длинной юбкой смонтированы 22 датчика давления, а вдоль противоположной ей образующей — 22 датчика тепловых потоков. Количество датчиков на модели с короткой юбкой составляло соответственно по семнадцать.

В сечении $\bar{X} = X/L = 0,21$ давление измерялось четырьмя датчиками, расположенными через 90° по периметру сечения. Сигналы с датчиков давления регистрировались универсальными АЦП ЛА-1.5 и ЛА-2М5 и поступали на ПЭВМ, а сигналы с коаксиальных термопар датчиков тепловых потоков регистрировались быстродействующей измерительной системой SCP-3200. Запись экспериментальной информации производилась синхронно по команде с управляющей аэродинамической трубой ЭВМ в течении трех секунд с разрешением по времени 0,1 мс. Регистрация спектров обтекания модели, полученных с помощью прибора ИЗК-462, производилась цифровой видеокамерой со скоростью съемки 1000 кадров в секунду.

Испытания модели проводились в двух вариантах — с короткой и длинной юбкой при нулевом угле атаки. В таблице приведены режимы, на которых испытывались конкретные конфигурации модели. Испытания модели проводились при двух значениях числа Маха потока $M_\infty \approx 10, 15$ в диапазоне чисел $Re_L = 10^5 - 10^6$. Число Re_L определялось по длине модели с короткой юбкой, равной 0,114 м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обтекание модели гиперболоид вращения с юбкой даже при нулевом угле атаки характеризуется отрывом пограничного слоя с последующим его присоединением на поверхности длинной юбки или за ее пределами в случае короткой юбки. Обычно такое течение сопровождается появлением перед зоной отрыва так называемого отрывного скачка уплотнения, который взаимодействует с головной ударной волной (УВ). Процесс течения при этом существенно нестационарный. Для иллюстрации на рис. 3 приведены некоторые теневые картины обтекания моделей НФ с длинной и короткой юбкой, полученные на режиме $M_\infty = 15$ при $Re_L = 0,78 \cdot 10^6$. Видны основные элементы газодинамической структуры течения при обтекании модели. Ударная волна, индуцируемая изломом поверхности модели, взаимодействует с пограничным слоем, что приводит к формированию отрывной зоны перед которой наблюдается отрывной скачок уплотнения.

Взаимодействие УВ от носовой части и излома поверхности модели происходит с образованием контактного разрыва и волны разрежения. В отличие от модели НФ с короткой юбкой, на модели НФ с длинной юбкой это взаимодействие происходит непосредственно над поверхностью юбки.

Пуск	Модель	M	Re_L	P_0 , МПа	T_0 , К
580	Короткая юбка	9,92	$2,63 \cdot 10^6$	31,9	1039
582	Короткая юбка	9,91	$2,61 \cdot 10^6$	31,1	1031
583	Короткая юбка	10,53	$1,11 \cdot 10^5$	2,90	1405
587	Короткая юбка	10,54	$0,98 \cdot 10^5$	2,70	1388
910	Короткая юбка	14,99	$0,78 \cdot 10^6$	61,1	1576
911	Короткая юбка	14,99	$0,79 \cdot 10^6$	61,7	1578
915	Короткая юбка	14,56	$0,28 \cdot 10^6$	30,3	1828
916	Короткая юбка	14,57	$0,28 \cdot 10^6$	28,2	1775
917	Короткая юбка	14,50	$0,22 \cdot 10^6$	23,0	1770
921	Длинная юбка	14,98	$0,78 \cdot 10^6$	61,2	1579
922	Длинная юбка	14,98	$0,78 \cdot 10^6$	62,0	1582

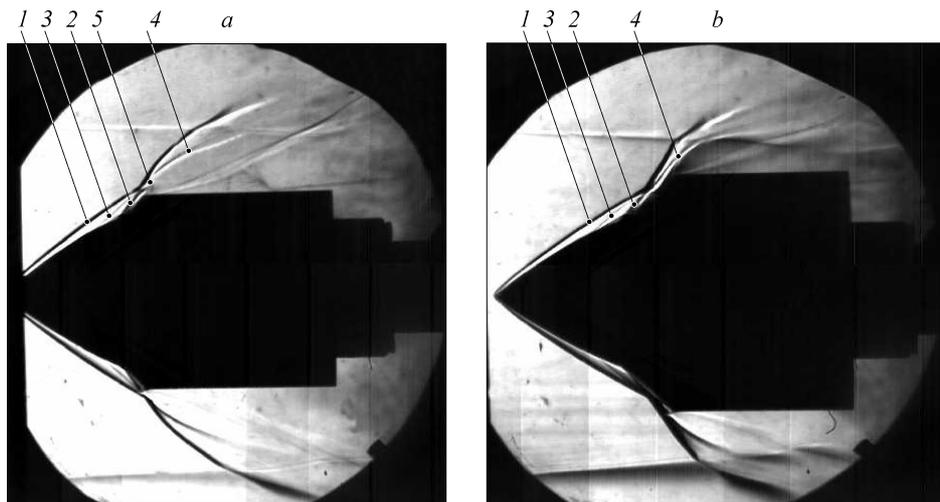


Рис. 3. Теневые картины обтекания моделей HF при $M_\infty = 15$: *a* — HF с короткой юбкой, *b* — HF с длинной юбкой.

1 — головная УВ, 2 — УВ от излома поверхности модели, 3 — отрывной скачок уплотнения, 4 — контактный разрыв, 5 — волна разрезания.

Эти основные особенности обтекания зависят от числа Рейнольдса и формируют уровень тепловых потоков. Поэтому получение достоверных экспериментальных данных при натуральных числах Re_L несомненно является актуальной задачей как с точки зрения расширения представления о подобных течениях, так и для верификации развиваемых методов расчета.

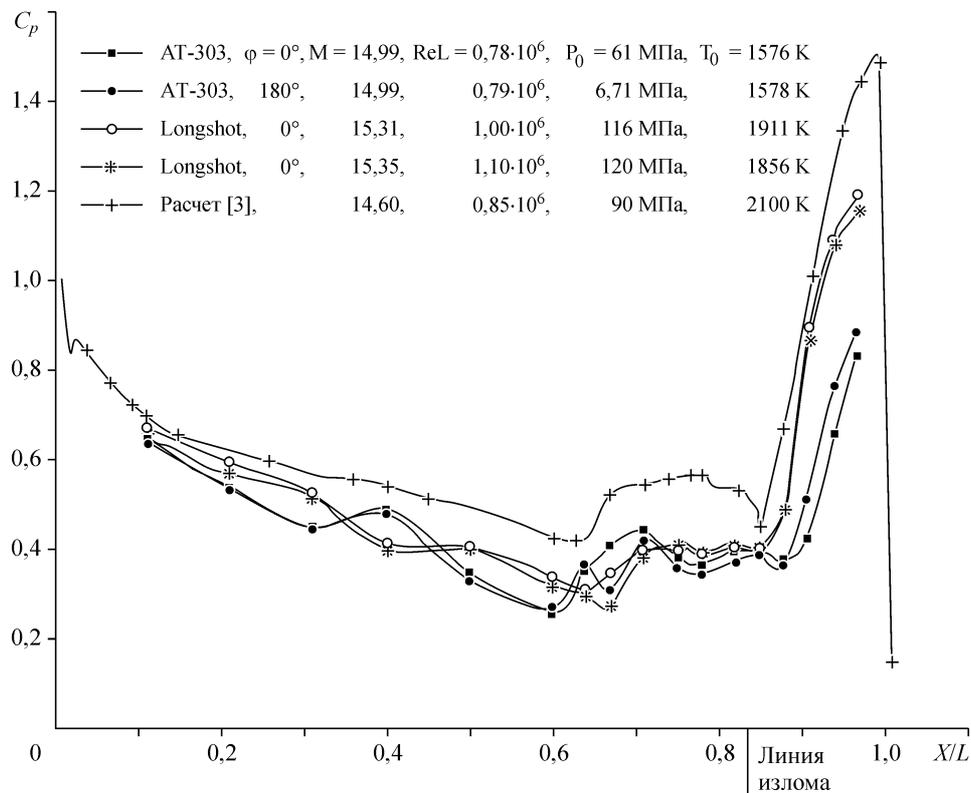


Рис. 4. Распределения коэффициентов давления по модели HF с короткой юбкой, полученные в AT-303, Longshot и численным расчетом в [3].

На рис. 4 приводятся распределения коэффициентов давления по образующей модели HF с короткой юбкой (темные символы), полученные в АТ-303 при $M_\infty = 15$ для двух чисел Re_L при разных азимутальных ориентациях модели. Хорошее согласование распределений коэффициентов давления, измеренных при азимутальных углах модели $\varphi = 0^\circ$ и 180° , указывает на отсутствие заметных скосов в набегающем потоке. Аналогичные данные получены и при $M_\infty = 10$. На этом же рисунке полученные результаты по измерениям давления сравниваются с данными [2]. Согласование данных, полученных в различных аэродинамических трубах, наблюдается вплоть до линии излома контура модели. Заметное расхождение их появляется лишь на поверхности юбки в области присоединения оторвавшегося пограничного слоя. Главным образом такое расхождение объясняется нестационарностью течения в области присоединения, где величины приведенных средних давлений существенно зависят от условий осреднения, а также, возможно, небольшим отличием параметров торможения потока и используемых рабочих газов (в аэродинамической трубе Longshot используется азот). Наблюдаемая с помощью видеокамеры нестационарность течения проявляется в виде расходных пульсаций, происходящих с частотой порядка 100–150 Гц. При этом периодически происходило постепенное увеличение размера зоны отрыва с последующим резким перемещением ее вблизи поверхности модели против набегающего потока в сторону носовой части.

Приведенные для сравнения здесь же результаты расчетов, проведенных для условий трубы Longshot [3], согласуются с экспериментальными данными только качественно, при этом заметно превышая их по всей длине модели.

На рис. 5 распределения коэффициентов давления, измеренные при $M_\infty \approx 10$ в АТ-303, сопоставляются с аналогичными данными, полученными в высокоэнтуальпийной трубе HEG [4], в которой значение числа $Re_L = 5,62 \cdot 10^4$ в 46 раз меньше числа Рейнольдса в АТ-303. Видно, что, начиная с сечения, соответствующего началу отрыва пограничного слоя на поверхности гиперболоида, коэффициенты давления вдоль образующей модели существенно различаются. При этом значения C_p , соответствующие меньшим числам Re_L (HEG), значительно выше.

Следует отметить, что температура торможения потока в этой трубе составляла 7000 К, поэтому модель в таких условиях обтекается смесью воздуха с его активными радикалами. Это дает основание предположить, что наблюдаемые расхож-

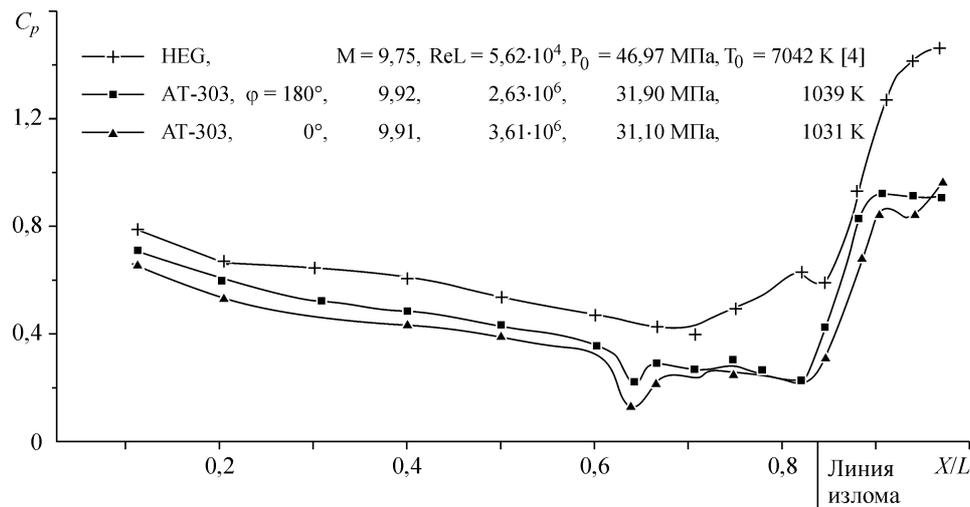


Рис. 5. Распределения коэффициентов давления по модели HF с короткой юбкой, полученные в АТ-303 и HEG [4].

дения. определяются обтеканием модели неравновесным газом в отличие от его равновесного состояния в АТ-303. Надо заметить, что коэффициент давления C_p , являющийся критерием подобия для совершенного газа, в условиях неравновесного обтекания модели, возможно, не отражает количественное изменение распределения давления на ее поверхности в зависимости от числа Рейнольдса.

Реализация широкого диапазона чисел Рейнольдса в АТ-303 (вплоть до натурных условий) позволила выявить важные особенности в формировании тепловой нагрузки на поверхность модели НФ.

Так, на рис. 6 приведены распределения тепловых потоков к поверхности модели НФ с короткой юбкой, полученные в АТ-303 при $M = 10$ для двух чисел Re_L , отличающихся более чем на порядок (в 26 раз). Видно, что уровни теплового потока практически по всей длине модели на режимах с высоким значением числа Re_L превышают соответствующие уровни, реализуемые при низких числах Re_L . Наибольшее влияние числа Re_L проявляется в окрестности присоединения пограничного слоя к поверхности юбки, где максимальные уровни теплового потока отличаются на порядок. Заметно меньшее влияние числа Рейнольдса наблюдается в безотрывной области течения.

Надо заметить, что согласование распределений тепловых потоков по длине модели, полученных при азимутальных углах модели $\varphi = 0^\circ$ и 180° указывает на хорошую тепловую равномерность набегающего потока.

Сравнение распределений относительных тепловых потоков (по отношению к величине теплового потока в первой измерительной точке) позволяет частично исключить влияние различия параметров набегающего потока и тем самым повысить достоверность непосредственного влияния числа Re_L на распределение тепловых потоков по длине модели. Используя это свойство, на рис. 7 представлены результаты измерений тепловых потоков к поверхности модели НФ, полученные

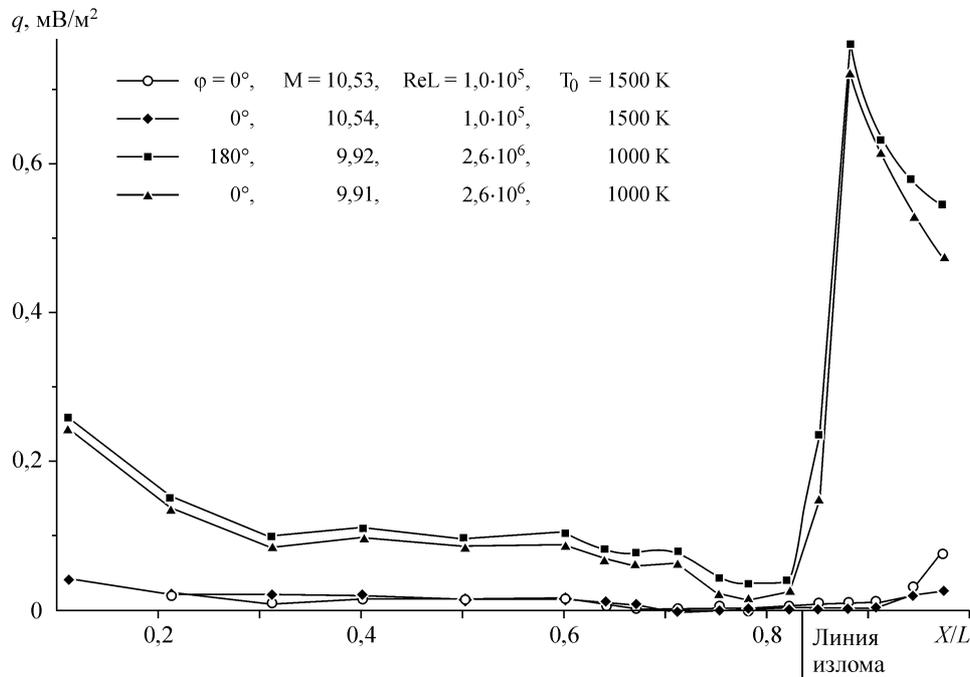


Рис. 6. Влияние величины числа Рейнольдса на распределение тепловых потоков к поверхности модели НФ с короткой юбкой.

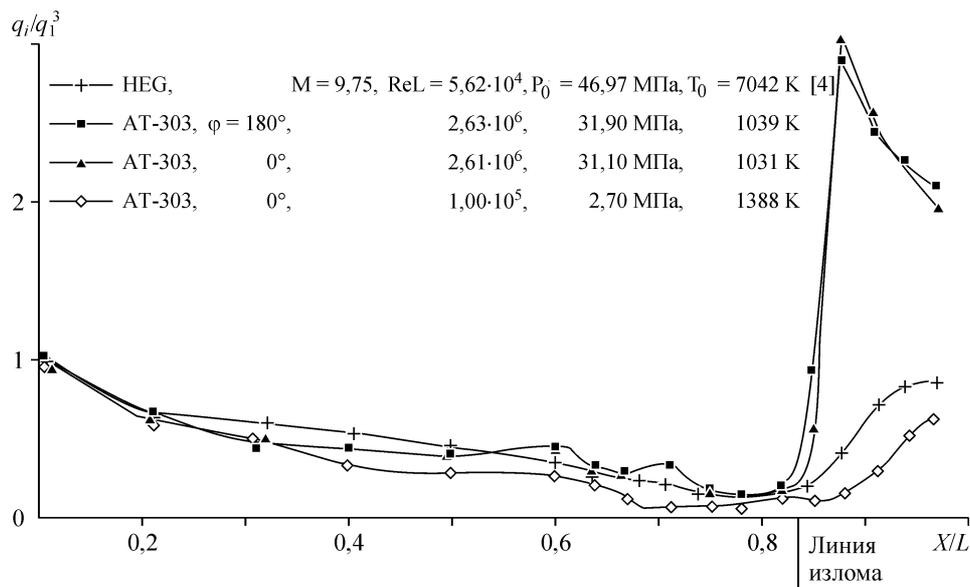


Рис. 7. Распределения относительных тепловых потоков к поверхности модели HF с короткой юбкой, полученные в AT-303 и HEG [4].

в трубах AT-303 и HEG при $M_\infty = 10$ в виде величин, отнесенных к уровню теплового потока в первой измерительной точке. Видно, что до начала зоны отрыва распределения относительных тепловых потоков, полученных в разных аэродинамических трубах, хорошо согласуются между собой. Влияние числа Re_L проявляется в области отрыва и существенно возрастает в области присоединения оторвавшегося потока к поверхности юбки модели. При этом максимальный уровень относительного теплового потока к поверхности юбки в три раза превышает максимальную величину теплового потока на носовой части модели. На режимах с низкими значениями чисел Re_L как в трубе HEG, так и в AT-303 максимальные уровни теплового потока в этой же области юбки не превышают 60–80 % величины теплового потока в носовой части модели. То есть увеличение числа Re_L приводит к перераспределению тепловой нагрузки по длине модели, в результате чего максимальные уровни теплового потока реализуются на поверхности юбки.

Сравнения распределений тепловых потоков по моделям HF с короткой и длинной юбками при $M_\infty = 15$ приведено на рис. 8. На модели с длинной юбкой, как уже отмечалось, присоединение оторвавшегося потока происходит на поверхности юбки, что приводит к заметному изменению тепловой нагрузки в этой области. На расстоянии, соответствующем крайнему сечению короткой юбки, наблюдается существенное увеличение теплового потока, что, по всей вероятности, связано с устранением концевго эффекта. Под концевым эффектом понимается формирование волны разрежения в окрестности сопряжения концевго сечения короткой юбки модели гиперболоида с цилиндрической частью продолжения модели. Влияние этой волны разрежения приводит к существенной перестройке картины течения ниже по потоку после взаимодействия ударных волн 1, 2, 3 (см. рис. 3, а) по сравнению с обтеканием большой юбки в области, соответствующей концевому сечению малой юбки (см. рис. 3, б). Увеличение размера юбки модели практически не влияет на расположение, относительно модели, мест взаимодействия ударных волн (1, 2, 3), но при этом оно происходит над поверхностью юбки, что

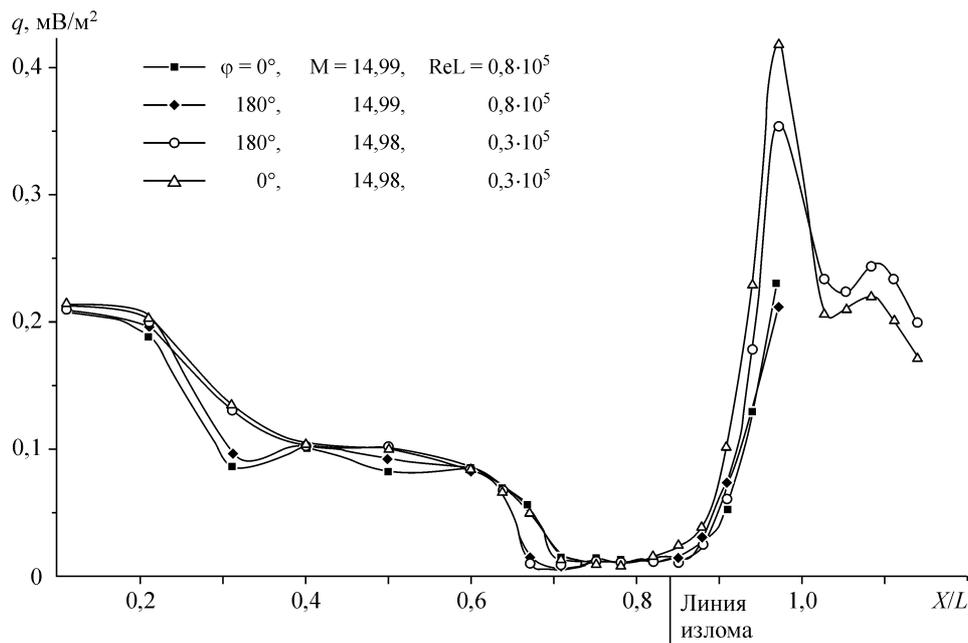


Рис. 8. Распределения тепловых потоков к поверхности модели HF с короткой и длинной юбкой.

приводит к усилению головной ударной волны, перестройке течения над поверхностью юбки и, в результате, к повышению уровней тепловых потоков на поверхности юбки.

В конце длинной юбки модели наблюдается второй максимум теплового потока. Можно полагать, что это вызвано также взаимодействием ударных волн происходящим, в отличие от модели с короткой юбкой, непосредственно над поверхностью юбки. Усиленная после этого взаимодействия головная УВ с образованием волны разрежения и контактного разрыва приводит к формированию локального увеличения теплового потока к поверхности юбки.

Сопоставление распределений относительных чисел Стантона (отнесены к числу St в первой измерительной точке), полученных в трубах АТ-303 и Longshot при близких значениях чисел Re_L (рис. 9), демонстрирует их качественное согласование между собой и с результатами численного расчета [3] вплоть до линии излома контура модели.

Наблюдаемые расхождения находятся в пределах погрешностей измерений и различий в параметрах торможения набегающего потока. Наибольшие расхождения наблюдаются также в окрестности присоединения оторвавшегося пограничного слоя, в которой течение характеризуется существенной нестационарностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В гиперзвуковой аэродинамической трубе АТ-303 исследованы характеристики обтекания модели гиперболоид вращения с юбкой при $M_\infty = 10$ и 15, результаты которых сопоставлены с аналогичными данными, полученными в европейских трубах Longshot и высокоэнтальпийной трубе HEG. С учетом различий в принципе работы этих установок, точности выполненных измерений и соответствия параметров потока между собой результаты согласуются лишь качественно в безотрывной области течения.

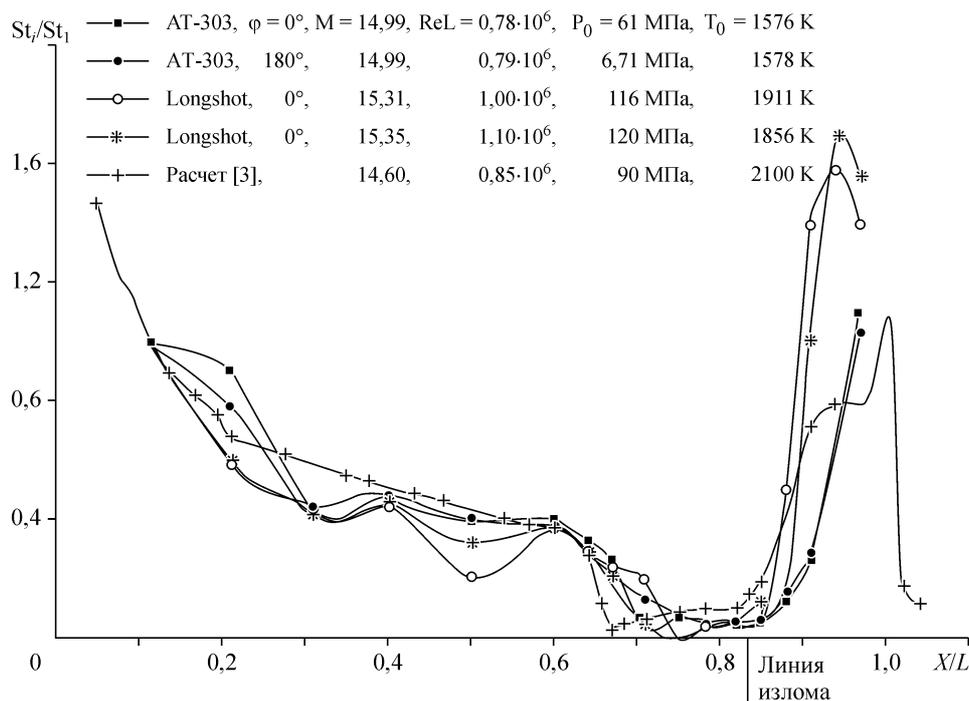


Рис. 9. Распределения относительных чисел Стантона по модели HF с короткой юбкой, полученные в AT-303, Longshot и численным расчетом в [3].

Наибольшие расхождения сравниваемых данных как по коэффициентам давления, так и по тепловым потокам наблюдаются в окрестности отрыва и присоединения пограничного слоя на юбке. Эти расхождения, возможно, связаны с нестационарностью течения в окрестности присоединения пограничного слоя, обтеканием модели неравновесным газом в высокоэнтальпийной трубе НЭГ и использованием в качестве рабочего газа азота в установке Longshot.

Показано, что увеличение на порядок числа Рейнольдса, реализованное в AT-303, приводит к существенному увеличению уровня теплового потока на поверхности юбки в области присоединения оторвавшегося потока и, тем самым, перераспределению тепловой нагрузки по длине модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Топчийн М.Е., Харитонов А.М.** Аэродинамическая труба для гиперзвуковых исследований (достижения, проблемы, перспективы) // Прикладная механика и техническая физика. — 1994. — Т. 35, № 3. — С. 66–79.
2. **Charbonnier J.-M., Paris S.** Hyperboloid Flare testing in the Longshot tunnel operated with variable testing gases // Doc. HT-TN-E34-431-VKIN, Von Karman Inst. for Fluid Dynamics. — 12 may 1996. — Iss. 1. — 43 p.
3. **Dieudonne W., Charbonnier J.-M., Deconinck H.** Flow over the Electre and Hyperboloid — Flare bodies in the VKI — Longshot wind — tunnel at standard operating conditions // Doc. HT-TN-E34-621-VKIN, Von Karman Inst. for Fluid Dynamics. — 29 nov. 1996. — Iss. 1. — 48 p.
4. **Krek R.M., Eitelberg G., Kastell D.** Hyperboloid flare experiments in the heg facility // Technical Report, Phase 1 HT-TR-E-1-201-DLRG. — ESA. — 12 sept. 1995. — 59 p.
5. **Чжен П.** Отрывные течения. — М.: Мир, 1972. — Т. 1. — 299 с.

Статья поступила в редакцию 5 апреля 2006 г.