

УДК 629.7

Д. А. АХМЕДЗЯНОВ, А. Е. КИШАЛОВ

РАСЧЕТЫ СЛОЖНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УЗЛОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS CFX

Проведено исследование адекватности и эффективности замены множества мелких отверстий на более простую геометрическую модель для оптимизации требуемых ресурсов и времени расчета в программном комплексе ANSYS 11.0 CFX [2, 3]. *Авиационные двигатели; газодинамическое моделирование; современные программные комплексы*

При создании современных авиационных двигателей становится невозможно проводить расчеты без применения программных комплексов для трехмерного газодинамического моделирования, например, таких, как ANSYS 11.0 CFX. При моделировании отдельных узлов ГТД возникает множество расчетных задач, в которых присутствуют отдельные элементы с геометрическими размерами на порядок меньшими, чем основная модель (отверстия в теплозащитном экране форсажной камеры, отверстия охлаждения жаровой трубы основной камеры сгорания, охлаждение лопаток турбины, теплообменник, различные сетки, решетки и т. д.). Расчеты с моделями, в которых данные элементы отсутствуют, дают большую погрешность (в основной камере сгорания около 20% всего воздуха проходит через отверстия для охлаждения жаровой трубы). Расчеты, в которых каждый элемент разрешен с высокой точностью (на каждом элементе построена довольно мелкая сетка), требуют невероятной мощности компьютеров и занимают огромное количество времени. В современном программном комплексе для численного моделирования газодинамических процессов ANSYS 11.0 CFX, предусмотрена возможность замены сложной геометрической модели (например, множества мелких отверстий) на пористую стенку, которая будет требовать существенно меньше ресурсов. Задачей данной статьи является исследование возможности замены сложной геометрии, содержащей множество мелких отверстий более простой геометрической моделью или пористой стенкой, которая будет требовать меньше ресурсов. Целью данной статьи является исследование адекватности и эффективности замены множества мелких отверстий на более простую

геометрическую модель, оптимизация требуемых ресурсов и времени расчета.

Ход работы. Скорость расчета определяется возможностями компьютера и сложностью геометрической модели. Наиболее значимые параметры компьютера для расчетов в программном комплексе ANSYS 11.0 CFX – частота процессора и объем оперативной памяти. Также на скорость расчетов большое влияние оказывает количество (набор) уравнений, решаемых для каждого элемента сетки и, соответственно, количество элементов в самой сетке, которое зависит от сложности геометрии и решаемой задачи. При этом в среднем для расчета требуется 1 Гб оперативной памяти на 1 млн элементов сетки.

При решении задач со сложной геометрией возникает необходимость изменить модель: заменить мелкую, сложную геометрию на более простую, требующую меньше компьютерных и временных ресурсов.

В данной статье рассмотрена геометрическая модель, в которой присутствуют множество мелких элементов – отверстий (рис. 1). Рассматриваются различные варианты замены: на отверстия большего диаметра, на отверстия прямоугольной формы, на щель, на пористую стенку.

Также проведены расчеты: расчет модели с мелкой сеткой ($\approx 600\,000$ элементов); расчет модели с грубой сеткой ($\approx 20\,000$ элементов); расчет модели с одним отверстием на очень мелкой сетке ($\approx 300\,000$ элементов на одно отверстие); подбор коэффициента гидравлического сопротивления для модели с пористой стенкой. Также проведен расчет коэффициента гидравлических потерь по методике, изложенной в [1].

Расчет №1. Модель для расчета приведена на рис. 1. Модель представляет собой цилинд-

рический канал, разделенный стенкой с 41-м отверстием.

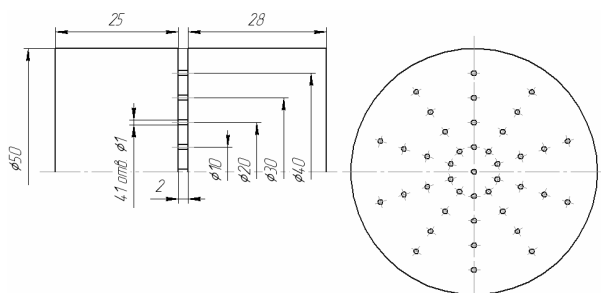


Рис. 1. Расчетная модель

На рис. 2 и 3 показана сетка, построенная на данной модели. Количество элементов данной модели: 634 622. Условие адекватного расчета: на каждом отверстии должно быть не менее 5 рядов элементов на диаметре и, желательно, структурированный призматический слой на стенках, где будет прилипание пограничного слоя.

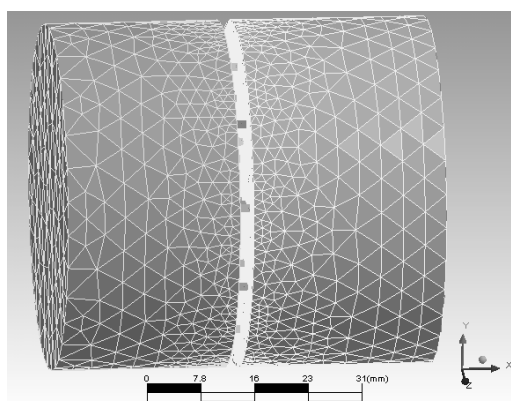


Рис. 2. Конечноэлементная модель

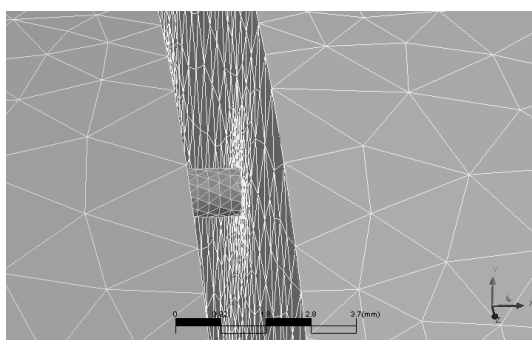


Рис. 3. Конечноэлементная модель на отверстии

Исходные данные для расчета. На левом торце модели – вход с параметрами: скорость $V = 2$ м/с, полная температура $T^* = 288$ К. Ссылочное давление $P_{ref} = 101325$ Па. На правом торце – свободный выход с параметрами: избыточное давление 0 Па, температура окружаю-

щего воздуха $T = 288$ К. На всех остальных стенках, кроме торцов и стенок отверстий (две цилиндрические поверхности), установлено граничное условие стенки со свободным скольжением (без прилипания пограничного слоя). Рабочее тело – Air Ideal Gas, модель теплопереноса Total Energy, модель турбулентности k-Epsilon. Проведено порядка 350 итераций до достижения устойчивого решения. Сходимость решения уравнений порядка 10^{-4} . В результате расчета получен перепад давления на отверстиях $\Delta P = 22716,3$ Па. Результаты расчетов приведены на рис. 4–5.

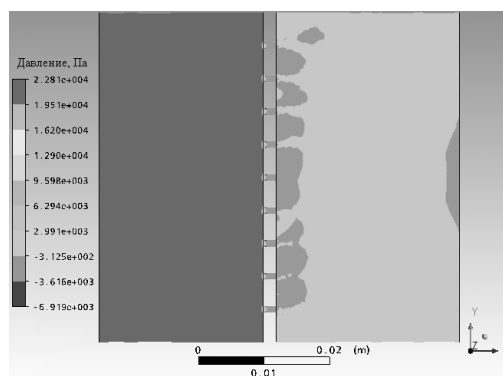


Рис. 4. Распределение избыточного статического давления на плоскости симметрии

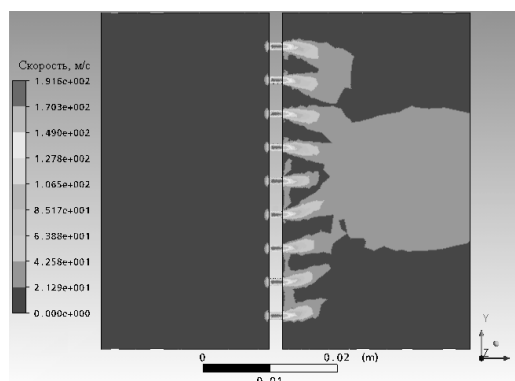


Рис. 5. Модули скоростей на плоскости симметрии

Расчет №2. Расчет с грубой сеткой. Модель для расчета аналогична модели в расчете № 1. На рис. 6 и 7 показана сетка, построенная на данной модели. Количество элементов данной модели: 20 071. Сетка получилась очень грубой. Она необходима для сравнения результатов расчета одной геометрической модели с различными по точности сетками.

Исходные данные для расчета соответствуют исходным данным расчета № 1. Проведено порядка 750 итераций до достижения устойчивого решения. Сходимость решения уравнений порядка 10^{-6} . В результате расчета получен

перепад давления на отверстиях $\Delta P = 111158,7$ Па. Результаты расчетов приведены на рис. 8–9.

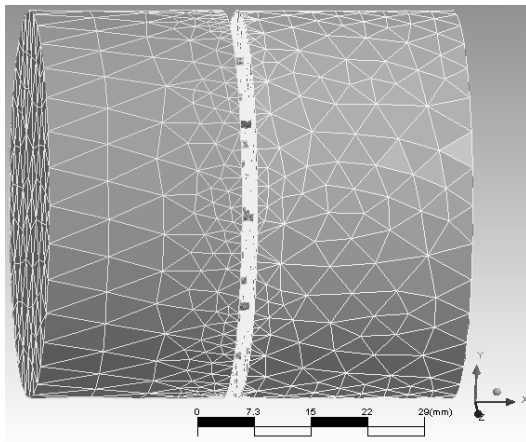


Рис. 6. Конечноэлементная модель

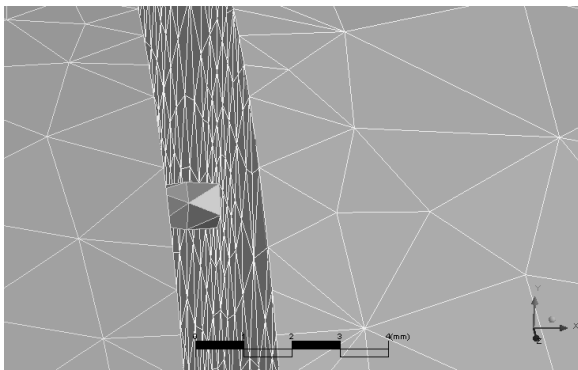


Рис. 7. Конечноэлементная модель на отверстии

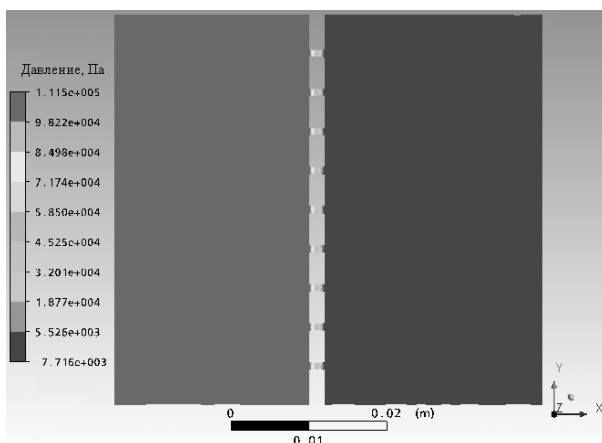


Рис. 8. Распределение избыточного статического давления на плоскости симметрии

Расчет № 3. Расчет с мелкой сеткой. Для того чтобы убедиться в том, что в расчете № 1 сетка достаточно мелкая и дальнейшее уменьшение размера элементов не даст эффекта, произведем расчет перепада давления на отверстиях с более мелкой сеткой. Из-за огромного

количества элементов, которое должно получиться на модели, представленной на рис. 1, произведем расчет на модели с одним отверстием (рис. 10). При этом отношение площади проходного сечения к площади канала в обеих моделях сохраняется постоянным.

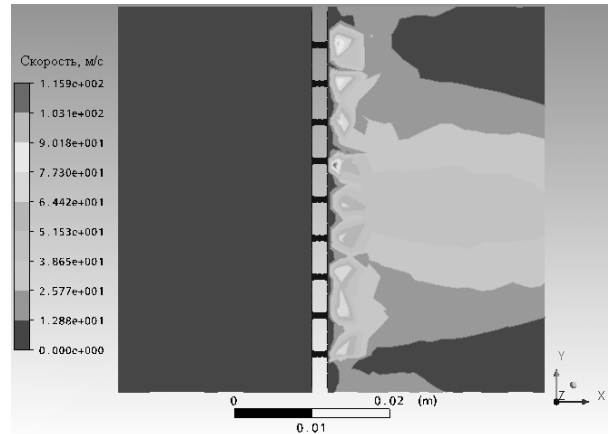


Рис. 9. Модули скоростей на плоскости симметрии

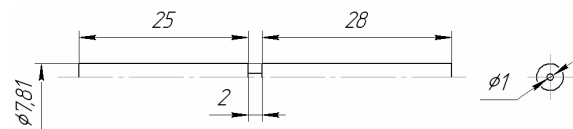


Рис. 10. Модель с одним отверстием

На рис. 11 и 12 показана сетка, построенная на данной модели. Количество элементов данной модели: 297 771.

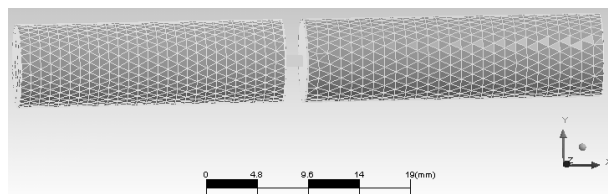


Рис. 11. Конечноэлементная модель

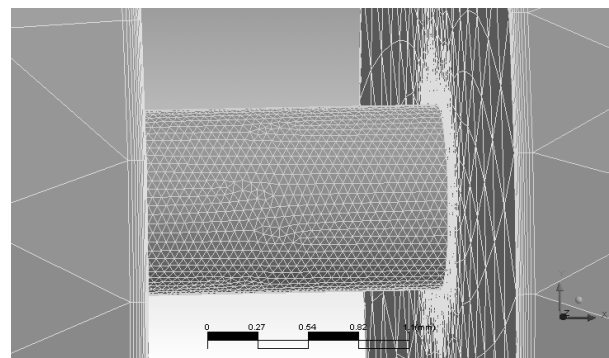


Рис. 12. Конечноэлементная модель на отверстии

Исходные данные для расчета соответствуют исходным данным расчета № 1. Проведе-

но порядка 1200 итераций до достижения устойчивого решения. Сходимость решения уравнений порядка 10^{-4} . В результате расчета получен перепад давления на отверстиях $\Delta P = 20095,7$ Па. Результаты расчетов приведены на рис. 13–14.

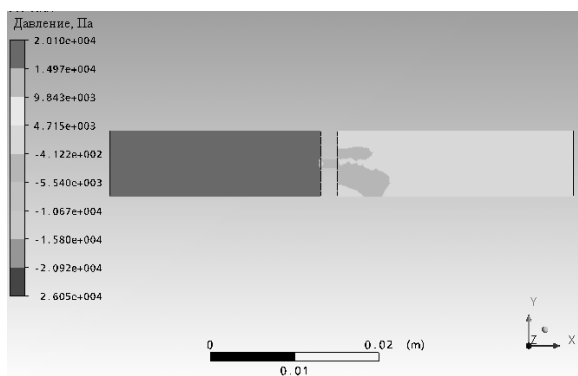


Рис. 13. Распределение избыточного статического давления на плоскости симметрии

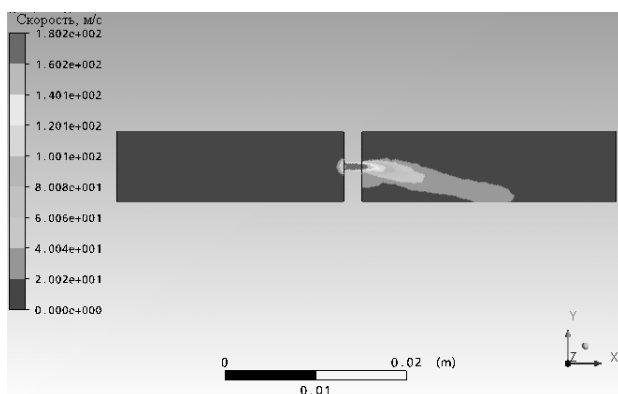


Рис. 14. Модули скоростей на плоскости симметрии

Расчет № 4. Расчет гидравлических потерь на перфорированной стенке. Для проверки проведенных расчетов в программном комплексе ANSYS 11.0 CFX, проведен расчет перепада давления по методике, приведенной в [1].

Перепад давления на отверстиях вычисляется по формуле:

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho V_{\text{вх}}^2}{2}, \quad (1)$$

где $\zeta = 8169,845$ вычисленный коэффициент гидравлического сопротивления, ρ – плотность воздуха, $V_{\text{вх}}$ – скорость воздуха.

Перепад давления на отверстиях: $\Delta P = 20030,2$ Па.

Расчет № 5. Замена на отверстия большего диаметра. Для экономии количества элементов рассмотрен вариант замены 41 отверстия диаметром 1 мм на 11 отверстий большего диаметра. При этом отношение площади про-

ходного сечения к площади канала (коэффициент живого сечения) в обоих вариантах сохраняется постоянным. Модель для расчета приведена на рис. 15. В ней одно отверстие диаметром 1,9306 мм расположено в центре, а остальные 10 таких же отверстий равномерно расположены на среднем диаметре.

На модели построена сетка с 202 438 элементами.

Исходные данные для расчета соответствуют исходным данным расчета № 1. Проведено порядка 100 итераций до достижения устойчивого решения. Сходимость решения уравнений порядка 10^{-4} . В результате расчета получен перепад давления на отверстиях $\Delta P = 21972,8$ Па.

Результаты расчетов приведены на рис. 16–17.

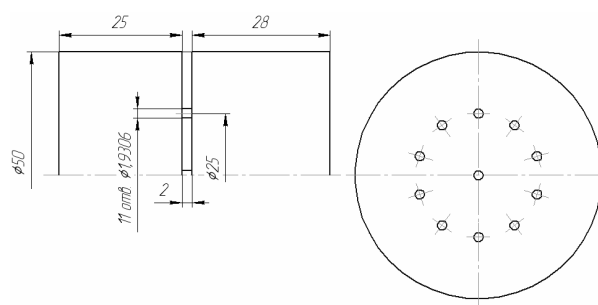


Рис. 15

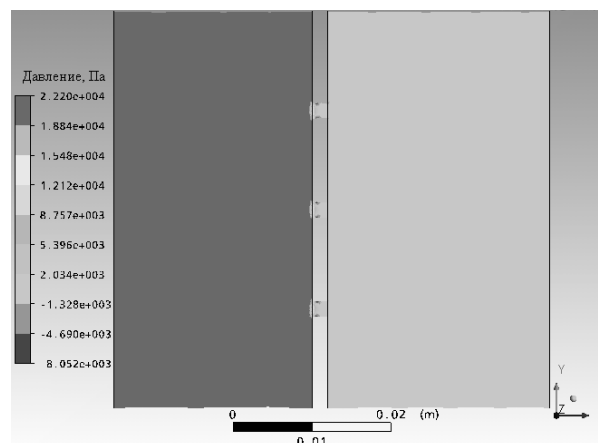


Рис. 16. Распределение избыточного статического давления на плоскости симметрии

Расчет № 6. Расчет гидравлических потерь на перфорированной стенке. Для определения «теоретической» погрешности, которую вносим, произведя замену на отверстия большего диаметра, проведем расчет перепада давления по методике приведенной в [1].

Вычисленный коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\zeta = 8758,288.$$

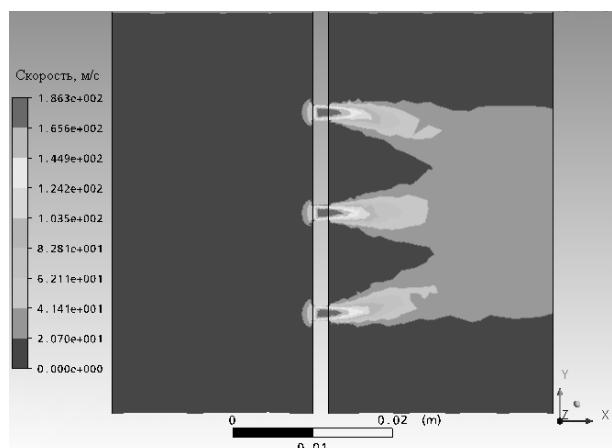


Рис. 17. Модули скоростей

Перепад давления на отверстиях, вычисленный по формуле (1):

$$\Delta P = 21472,9 \text{ Па.}$$

Замена отверстий на отверстия большего диаметра (при постоянном коэффициенте живого сечения) изменяет перепад давлений на перфорированной стенке (за счет изменения омываемой площади стенок).

Расчет № 7. Замена на узкую щель. Рассмотрен вариант замены отверстий кольцевой щелью, расположенной на среднем диаметре. При этом коэффициент живого сечения сохраняется постоянным. Модель для расчета приведена на рис. 18. Так как модель полностью симметрична, для расчета использована половина модели. В остальном исходные данные для расчета соответствуют исходным данным расчета № 1. На модели построена сетка с 599 046 элементами (на половине модели, на полной модели будет 1 198 092 элементов). Такая сетка необходима для адекватного «разрешения» кольцевой щели толщиной 0,8 мм. Проведено около 450 итераций до достижения устойчивого решения. Сходимость решения уравнений порядка 10^{-4} . В результате расчета получен перепад давления на отверстиях $\Delta P = 20040,4 \text{ Па}$. Результаты расчетов приведены на рис. 19–20 (результаты были симметрично отобраны для улучшения визуализации).

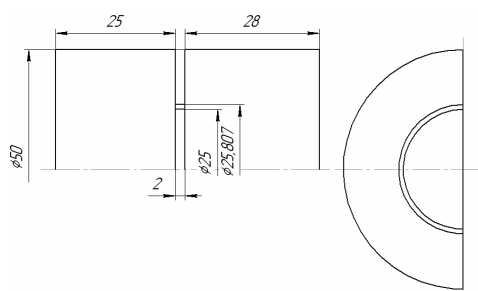


Рис. 18

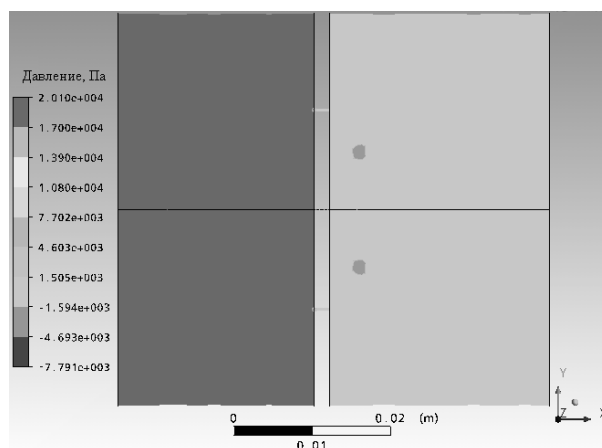


Рис. 19. Распределение избыточного статического давления на плоскости симметрии

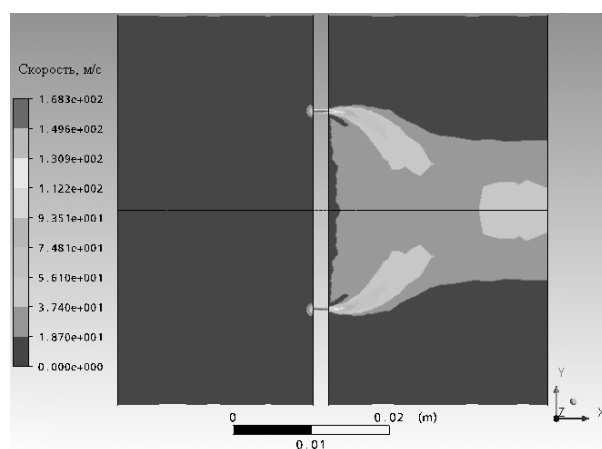


Рис. 20. Модули скоростей на плоскости симметрии

Расчет № 8. Замена на отверстия прямоугольной формы вариант А. Рассмотрен вариант замены отверстий на отверстия прямоугольной формы с площадью живого сечения равной суммарной площади отверстий. Модель для расчета приведена на рис. 21. На модели построена сетка с 274 241 элементами. Исходные данные для расчета соответствуют исходным данным расчета №1. Проведено порядка 250 итераций до достижения устойчивого решения. Сходимость решения уравнений порядка 10^{-6} . В результате расчета получен перепад давления на отверстиях $\Delta P = 19998,5 \text{ Па}$. Результаты расчетов приведены на рис. 22–23.

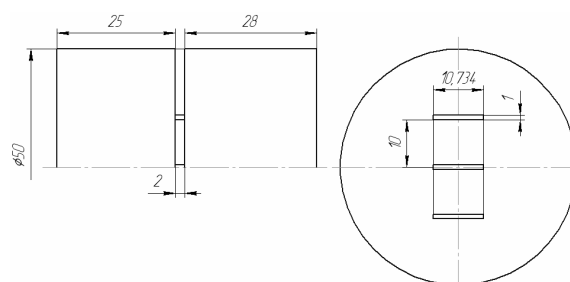


Рис. 21

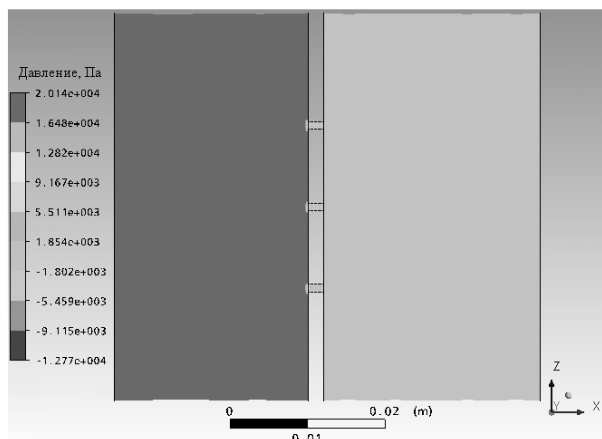


Рис. 22. Распределение избыточного статического давления на плоскости симметрии

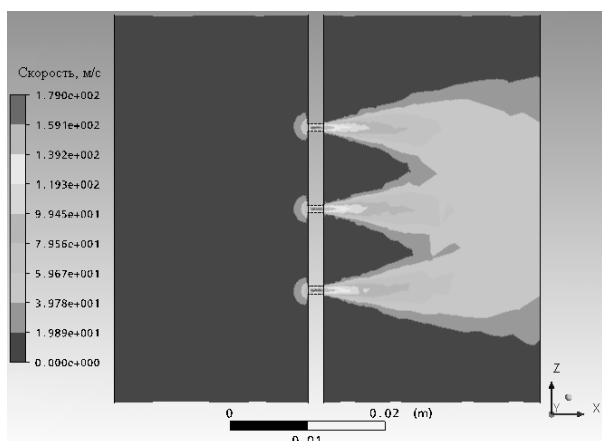


Рис. 23. Модули скоростей на плоскости симметрии

Расчет № 9. Замена на отверстия прямоугольной формы вариант Б. Рассмотрен вариант замены отверстий на отверстия прямоугольной формы с площадью живого сечения равной суммарной площади отверстий. Расчетная модель расчета № 8 дает большую неравномерность поля скоростей на выходе, чего не было в расчете № 1. Поэтому предложена модель, в которой прямоугольные отверстия распределены более равномерно по площади. Модель для расчета приведена на рис. 24. Для удовлетворительного «разрешения» прямоугольных отверстий понадобилась сетка с 192 422 элементами. Исходные данные для расчета соответствуют исходным данным расчета № 1. Проведено порядка 100 итераций до достижения устойчивого решения. Сходимость решения уравнений порядка 10^{-4} . В результате расчета получен перепад давления на отверстиях $\Delta P = 21936,5$ Па. Результаты расчетов приведены на рис. 25–26.

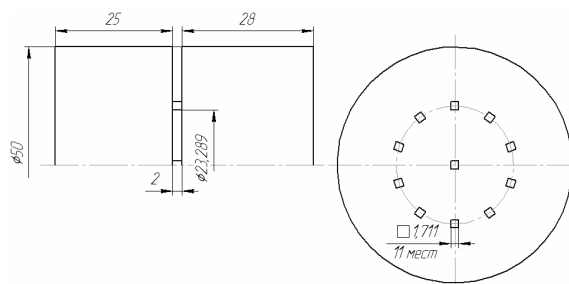


Рис. 24

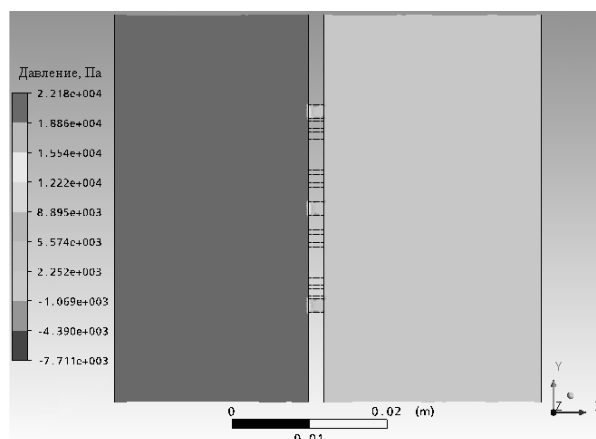


Рис. 25. Распределение избыточного статического давления на плоскости симметрии

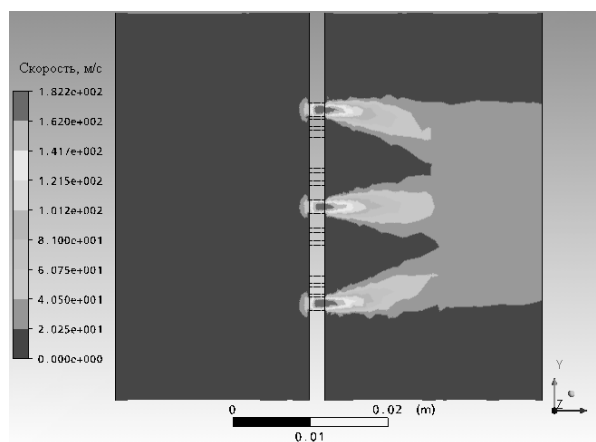


Рис. 26. Модули скоростей на плоскости симметрии

Расчет № 10. Замена на пористую стенку. Рассмотрен вариант замены отверстий на пористую стенку с характеристиками, соответствующими перфорированной стенке из расчета №1. Модель для расчета приведена на рис. 27. Она состоит из трех частей: «Вход», «Выход» и «Пористая стенка». Каждая из этих трех частей создавалась и разбивалась на сетку по отдельности. На рис. 28–30 представлены сетки построенной на разных частях модели. Суммарное количество элементов модели: 40 798. Исходные данные для расчета соответствуют исходным данным расчета № 1. Коэффициент объемной пористости «Пористой стенки» (ко-

эффицент живого сечения) = 0,0164. Путем подбора был найден коэффициент (Resistance Loss Coefficient) на «Пористой стенке», при котором перепад давления на модели $\Delta P = 20030,2$ Па: 702,7366 1/м.

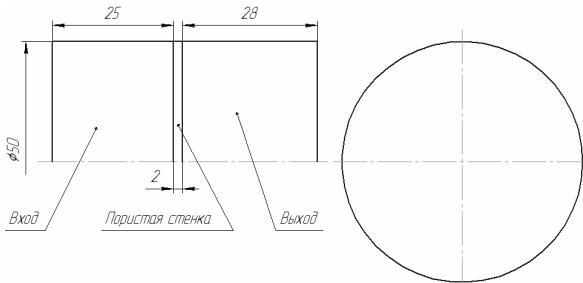


Рис. 27

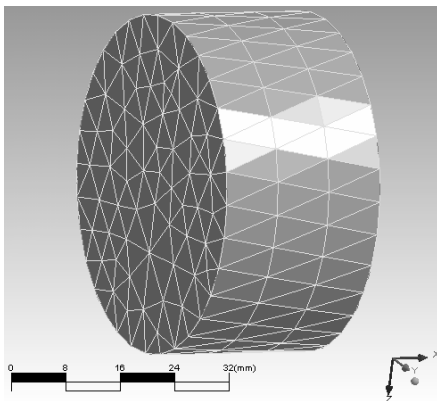


Рис. 28. «Вход»

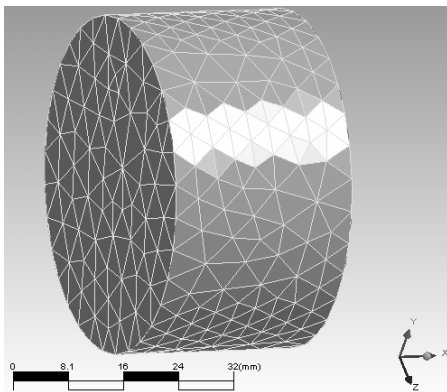


Рис. 29. «Выход»

Проведено порядка 550 итераций до достижения устойчивого решения. Сходимость решения уравнений порядка 10^{-5} . В результате расчета получена модель с пористой стенкой, адекватно заменяющая перфорированную стенку (из расчета № 1). Перепад давления $\Delta P = 20045,9$ Па. Результаты расчетов приведены на рис. 31–32.

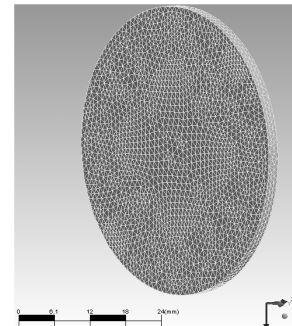


Рис. 30. «Пористая стенка»

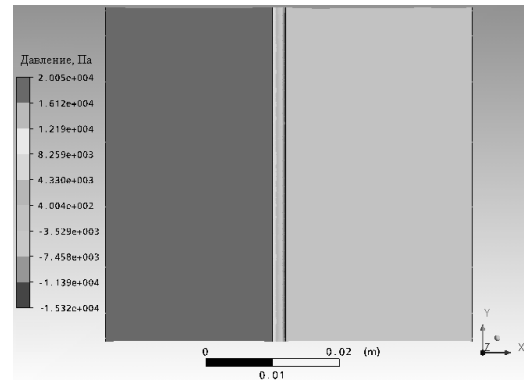


Рис. 31. Распределение избыточного статического давления на плоскости симметрии

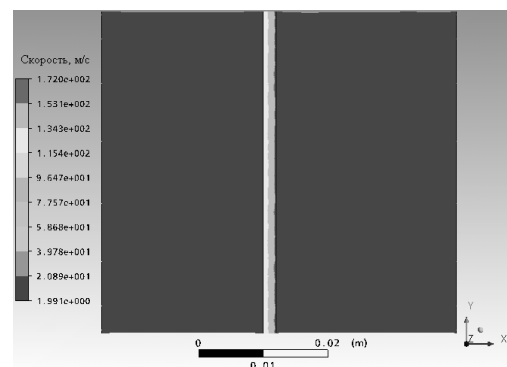
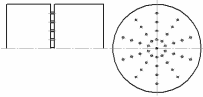
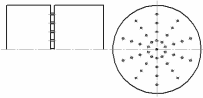

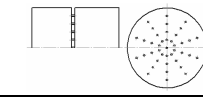
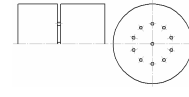
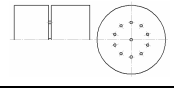
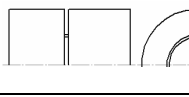
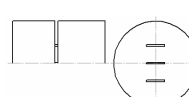
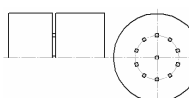
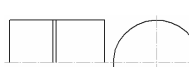


Рис. 32. Модули скоростей на плоскости симметрии

Анализ полученных результатов. Схемы и результаты расчетов приведены в табл. 1.

В расчете № 1 сетка состоит из 634 622 элементов и перепад давлений на отверстиях $\Delta P = 22716,3$ Па. Перепад давлений на отверстиях, рассчитанный по методике, приведенной в [1] (расчет № 4) $\Delta P = 20030,2$ Па. Погрешность расчета №1, по сравнению с расчетом № 4 составила 13,4%. Расчет на грубой сетке (20 071 элементов, расчет № 2) показал, что погрешность расчета значительно возрастает (389,3%). При расчете на более мелкой сетке с моделью одного отверстия (расчет № 3) перепад давления на отверстии $\Delta P = 20095,7$ Па, погрешность расчета по сравнению с расчетом № 4 составила 0,3%.

Таблица 1

Схемы и результаты расчетов				
Название расчета	Схема расчета	Количество элементов в модели	Перепад давления ΔP , Па	Погрешность расчета, %
Расчет № 1		634 622	22716,3	13,4
Расчет № 2. Расчет с грубой сеткой.		20 071	111158,7	389,3
Расчет № 3. Расчет с мелкой сеткой		297 771	20095,7	0,3
Расчет № 4. Проверочный расчет		–	20030,2	–
Расчет № 5. Замена на отверстия большего диаметра		202 438	21972,8	9,7
Расчет № 6. Проверочный расчет		–	21472,9	–
Расчет № 7. Замена на узкую щель		1 198 092	20040,4	0,05
Расчет № 8. Замена на отверстия прямоугольной формы вариант А		274 241	19998,5	0,2
Расчет № 9. Замена на отверстия прямоугольной формы вариант Б		192 422	21936,5	9,5
Расчет № 10. Замена на пористую стенку		40 798	20045,9	0,08

При замене отверстий на отверстия большего диаметра (расчет № 5), потребовалась сетка с количеством элементов в модели: 202 438. Перепад давления на отверстиях $\Delta P = 21972,8$ Па. Гидравлические потери на данной модели, рассчитанные по методике, приведенной в [1] (расчет № 6), $\Delta P = 21472,9$ Па. Погрешность расчета № 5 по сравнению с расчетом № 6 составила 2,3%. Погрешность расчета № 5 по сравнению с расчетом № 4 составила 9,7%.

При замене отверстий на узкую кольцевую щель (расчет № 7), потребовалась сетка с 599 046 элементами (на половине модели; на полной модели – 1 198 092 элементов). Гидрав-

лические потери на щели $\Delta P = 20040,4$ Па. Погрешность расчета по сравнению с расчетом № 4 составила 0,05%. Однако, хотя точность расчета очень высокая, данный вариант не приемлем, так как для удовлетворительного разрешения узкой щели требуется огромное количество элементов и на выходе из модели – значительная неравномерность скорости.

При замене отверстий на отверстия прямоугольной формы (вариант А) потребовалась сетка с 274 241 элементами, перепад давлений $\Delta P = 19998,5$ Па (расчет № 8), что составляет погрешность 0,2% по сравнению с расчетом № 4. Однако данная модель дает большую деформацию поля скоростей на выходе (по срав-

нению с расчетом № 1), что вполне приемлемо для данной простой модели и неприемлемо для более сложных моделей, где расчетная область продолжается за отверстиями и эпюра скоростей очень важна.

Замена на отверстия прямоугольной формы (вариант Б) имеет на выходе несколько лучшее распределение скоростей и не требует большого количества элементов (192 422); перепад давлений $\Delta P = 21936,5$ Па (расчет № 9). Погрешность по сравнению с расчетом № 4 составила 9,5%. Данная замена практически ничем не отличается от замены на отверстия большего диаметра (расчет № 5).

Замена отверстий на пористую стенку (расчет № 10) дает наилучшие результаты: при суммарном количестве элементов модели 40 798, погрешность расчета практически отсутствует. Из недостатков данной замены можно отметить только необходимость проведения нескольких расчетов, с целью подбора коэффициента потерь и «излишнюю» равномерность поля скоростей на выходе из модели (рис. 31, 32).

Таким образом, любая замена, упрощение геометрической и физической моделей ведет к неизбежному увеличению погрешности расчета. Задачей конструктора (разработчика) является определение допустимых границ упрощения, при которых расчет будет произведен с допустимой точностью. Замена отверстий на отверстия большего диаметра, на отверстия прямоугольной формы, или на узкую щель, приводят к деформации поля скоростей, давлений и не приводят к большим «выгодам» по затрачиваемым ресурсам компьютера. Замена отверстий пористой средой влияет на поля скоростей и давлений в обратную сторону, усредняет их. Это также служит дополнительным источником ошибки. Однако для равномерно расположенных отверстий (как, например, для теплозащитного экрана форсажной камеры сгорания), данная замена вполне приемлема, тем

более что она дает значительный выигрыш по количеству элементов, а следовательно, и по требуемым ресурсам системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Государственное энергетическое издательство М.: 1960 г. 464 с.
2. CAE-система ANSYS [Электронный ресурс] / 1995–2008 (<http://www.ansys.com>).
3. Электронный журнал для пользователей CAE-системой ANSYS [Электронный ресурс] / 1995–2008 (<http://www.ansysolutions.ru>).

ОБ АВТОРАХ

Ахмедзянов Дмитрий Альбертович, проф. каф. авиац. двигателей, зам. декана ФАД. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энерг. уст. (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. рабочих процессов в авиац. ГТД, разработки матем. моделей сложн. техн. объектов, САПР авиац. ГТД.



Кишалов Александр Евгеньевич, асп. той же каф. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энерг. уст. (УГАТУ, 2006). Дипл. инж.-констр. ФГУП НПП «Мотор». Иссл. в обл. автоматизации и газодинамического моделирования форсажных камер сгорания авиац. ГТД.

