

УДК533.55; 533.69.046; 533.6.011.5; 533.6.017.2

Влияние шероховатости внутренних поверхностей сверхзвукового струйного аппарата эжектора на режим его работы

Д.В. Брезгин¹, К.Э. Аронсон¹, А. Милаццо², Ф. Маццелли²

¹*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина: Уральский энергетический институт, Екатеринбург*

²*Флорентийский университет, Италия*

E-mail: k.e.aronson@urfu.ru

С использованием двух коммерческих CFD-решателей (Star-CCM+ и Fluent) получены результаты численного моделирования влияния шероховатости поверхностей на газодинамические процессы, происходящие в проточной части сверхзвукового эжектора. Результаты сопоставлялись между собой и верифицировались натурным экспериментом как по коэффициенту инжекции, так и по величине статического давления вдоль стенок камеры смешения и диффузора. Проведено детальное сравнительное исследование используемых методов и подходов в обоих CFD-пакетах по оценке влияния шероховатости на логарифмический закон распределения скоростей внутри пограничного слоя. Влияние шероховатости в струйном аппарате эжектора сопоставлено с влиянием противодавления за диффузором. Установлено, что при возрастании противодавления эжектора и высоты шероховатости поверхности, сечение, где возникает скачок давления, смещается вверх по потоку. Результаты численных расчетов эжектора с шероховатыми стенками в обоих CFD-решателях хорошо согласуются между собой количественно по среднеинтегральным характеристикам и качественно — по локальным характеристикам потока. Установлено, что в случае превышения «критической высоты шероховатости» для заданных граничных условий и геометрии проточной части эжектора последний переходит на допредельный (off-design) режим работы и его производительность значительно снижается.

Ключевые слова: сверхзвуковой эжектор, коэффициент инжекции, CFD, логарифмический закон стенки, песочная шероховатость.

При разработке и эксплуатации сверхзвуковых эжекторов принимается, что шероховатость внутренних поверхностей струйного аппарата не влияет на характеристики его работы [1, 2]. При этом в ряде публикаций рекомендуется выполнять элементы струйного аппарата эжектора с минимально возможной шероховатостью (см., например, [3]). В настоящей статье представлены результаты численных и натуральных экспериментов по исследованию влияния шероховатости на газодинамические процессы, происходящие в проточной части сверхзвукового эжектора. Численное моделирование проведено с использованием двух коммерческих CFD-решателей (Star-CCM+ и Fluent). В связи с тем, что одной из целей исследования в рамках представленной работы было сравнение CFD-решателей между собой при решении одной задачи, результаты численного моделирования сопоставлялись между собой и верифицировались данными натурального эксперимента [4]. Сравнение результатов численных расчетов и эксперимента проводилось не только по среднеинтегральным характеристикам, к которым относится расход рабочего

и инжектируемого потоков, а также по величине статического давления вдоль стенок камеры смешения и диффузора. Влияние шероховатости на газодинамические процессы в струйном аппарате эжектора сопоставлялось с влиянием противодавления за диффузором.

На рис. 1 приведена схема конструкции типового эжектора. Струйный аппарат эжектора состоял из сверхзвукового профилированного рабочего сопла и профилированного диффузора. Термин «профилированный» здесь означает, что геометрия основных узлов, к которым относятся рабочее сопло, камера смешения и диффузор, в продольном сечении представляет собой не цилиндр или конус, а криволинейную поверхность, которая, в общем случае, описывается полиномами Безье 2-го или 3-го порядка.

Основываясь на данных литературного обзора [5–7], в качестве модели турбулентности выбрана модель $k-\omega$ SST, удовлетворительно зарекомендовавшая себя при решении подобных задач. В численной модели и в эксперименте в качестве рабочего тела использовался пентафлуоропропан R245fa, далее хладон. Хладон R245fa является органической жидкостью и одним из наиболее востребованных рабочих тел в низкотемпературном органическом цикле Ренкина в связи с невысокой температурой кипения ($t_{\text{кип}} \sim 288$ К при $P = 100$ кПа) и положительным наклоном линии насыщения во всем диапазоне изменения энтропии на T - S диаграмме. Такое особое поведение линии насыщения в T - S диаграмме предотвращает образование двухфазной (жидкость–газ) смеси в процессе расширения хладона в соплах.

Известно, что модель идеального газа удовлетворительно описывает свойства органической среды при невысоких давлениях и температурах, однако вблизи линии насыщения и критической точки наблюдаются заметные отклонения в поведении «идеального» и «реального» газов [8]. В работе [9] представлено сравнительное исследование нескольких уравнений состояния применительно к хладону R245fa. Здесь, основываясь на данных Национального Института Стандартизации и Технологии США (NIST) [10], авторы доказывают, что модель состояния Пенг–Робинсона обеспечивает наилучшее согласование параметров хладона R245fa с данными NIST во всем исследованном диапазоне. Кубическое уравнение состояния Пенг–Робинсона, как и все уравнения состояния реального газа, учитывает силы межмолекулярного взаимодействия. Являясь уточнением уравнения Ван-дер-Ваальса, уравнение состояния Пенг–Робинсона позволяет описывать свойства реального газа исключительно в зависимости от трех индивидуальных свойств текучей среды: критического давления, критической температуры и ацентрического фактора, учитывающего асимметрию молекул. На основании того, что модель состояния Пенг–Робинсона встроена в оба CFD-решателя и ее применимость обоснована, она была выбрана для проведения дальнейших исследований в настоящей работе.

Для численного исследования важнейшим условием корректности постановки задачи влияния шероховатости стенок на производительность эжектора является выбор сеточной модели (конечно-объемной сетки). В соответствии с общепринятым подходом вязкий пограничный подслой можно разрешать двумя методами: сеточным разрешением

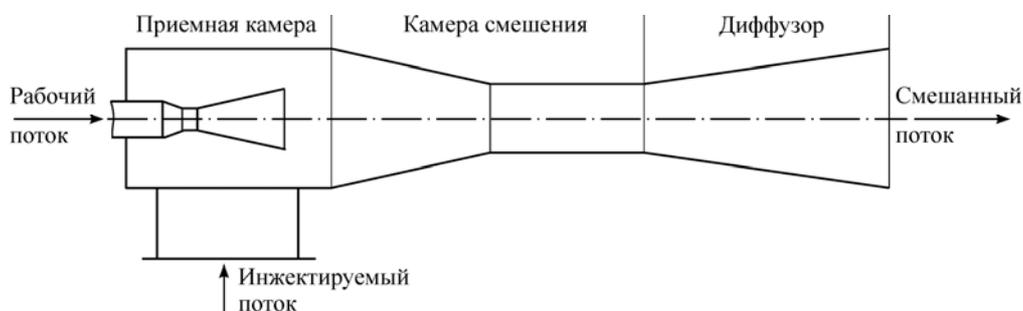


Рис. 1. Схема конструкции типового эжектора.

и разрешением с помощью пристеночной функции. Первый метод заключается в том, что пограничный слой разрешается непосредственно самой сеткой и заложенная модель турбулентности замыкает систему дифференциальных уравнений по всему контрольному объему, включая пристеночный пограничный слой. В этом случае достаточная точность при оценке напряжений сдвига в пограничном слое достигается только тогда, когда безразмерное расстояние от центра пристеночного узла до стенки (коэффициент Y^+) меньше единицы, а вся высота пограничного слоя включает в себя, как минимум, 10 рядов ячеек. Второй подход (с использованием пристеночной функции) характеризуется гораздо более грубой сеткой (коэффициент Y^+ составляет больше 30) и предполагает, что пристеночный ряд ячеек сетки лежит в области логарифмического закона распределения скоростей внутри пограничного слоя, а заложенная модель турбулентности справедлива только за пределами пограничного слоя.

Необходимо отметить, что в общем случае использование сеточного разрешения — несомненно оправданное решение, позволяющее получать наиболее согласованные с экспериментом результаты, особенно в задачах по оценке коэффициента сопротивления и задачах с сопряженным теплообменом. Однако при моделировании шероховатости во всех CFD-решателях для течения среды в области вязкого пограничного слоя используется так или иначе модифицированный метод разрешения с помощью пристеночной функции [11–13].

Связь между законом сопротивления и законом распределения скоростей в пограничном слое для труб с ненулевой шероховатостью обобщена в работах [14, 15]. Было показано, что распределение продольной составляющей скорости в пограничном слое для шероховатых труб имеет тот же наклон ($1/k$), что и для гладких труб, однако кривая смещается вниз благодаря добавочному коэффициенту (рис. 2):

$$U_{\text{тб}} = \frac{1}{k} \cdot \ln(9,0 \cdot Y^+) - \frac{1}{k} \cdot \ln(f_r), \quad (1)$$

здесь $U_{\text{тб}}$ — продольная составляющая скорости потока в пограничном слое, $k = 0,42$ — константа фон Кармана, f_r — функция шероховатости стенки, зависящая от типа и размера характерной шероховатости. Необходимо отметить, что в связи с разнообразием форм и типов шероховатости реальных поверхностей существование универсальной функции шероховатости исключается. Для сопоставления сопротивления труб с различными типами шероховатости автор [14] предложил сопоставлять данные с исследованной песочной шероховатостью, безразмерная высота которой определяется следующей зависимостью:

$$K_s^+ = \rho \cdot K_s \cdot u^* / \mu, \quad u^* = \sqrt{\tau / \rho}, \quad (2)$$

здесь K_s — высота песочной шероховатости (линейный размер), u^* — скорость трения, τ — напряжения сдвига, ρ — плотность, μ — динамическая вязкость. Основываясь на результатах собственных экспериментов, автор работы [14] определил три основных режима течения вдоль поверхности с ненулевой шероховатостью в зависимости от безразмерной высоты песочной шероховатости K_s^+ . К первому можно отнести режим без проявления шероховатости ($K_s^+ < 5$). Размеры зерен, образующих шероховатость, при таком гидравлически гладком режиме столь малы, что все выступы лежат внутри ламинарного

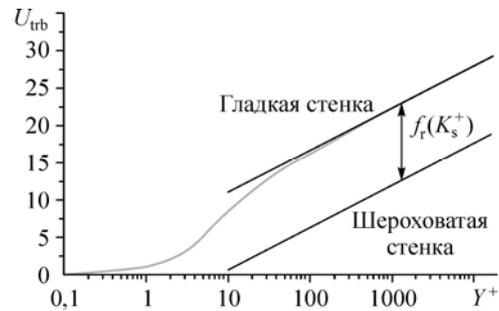


Рис. 2. Сдвиг логарифмического профиля скорости вследствие учета шероховатости поверхности [13, 14].

Таблица

Функции, используемые в CFD-пакетах при моделировании шероховатости

Режим	Star-CCM+	Fluent
Без проявления шероховатости, $K_s^+ \leq 2,25$	$f_r = 1$	$f_r = 1$
Переходный, $2,25 < K_s^+ \leq 90$	$f_r = \left(B \cdot \frac{K_s^+ - 2,25}{90 - 2,25} + C_s \cdot K_s^+ \right)^a,$ $a = \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\ln(K_s^+ / 2,25)}{\ln(90 / 2,25)} \right),$ $C_s = 0,253, B = 0,0$	$f_r = \left(\frac{K_s^+ - 2,25}{90 - 2,25} + C_s \cdot K_s^+ \right)^a,$ $a = \sin (0,4258 \cdot (\ln(K_s^+) - 0,8111)),$ $C_s = 0,5$
Полное проявление шероховатости, $K_s^+ > 90$	$f_r = B + C_s \cdot K_s^+,$ $C_s = 0,253, B = 0,0$	$f_r = 1 + C_s \cdot K_s^+,$ $C_s = 0,5$

(вязкого) подслоя. Ко второму — переходный режим ($5 < K_s^+ < 70$). Элементы шероховатости частично выступают из ламинарного подслоя. При этом дополнительное сопротивление возникает вследствие сопротивления формы элементов шероховатости, выступающих из ламинарного подслоя в турбулентный пограничный слой. Третий режим характеризуется полным проявлением шероховатости ($K_s^+ > 70$). Все элементы шероховатости выступают из ламинарного подслоя. Преобладающая часть сопротивления состоит из сопротивления формы отдельных элементов шероховатости, поэтому закон сопротивления получается квадратичным.

Авторы работы [16], основываясь на экспериментальных данных [14], скорректировали границы всех трех режимов и предложили функции для определения дополнительного сопротивления, связанного с шероховатостью поверхности. Именно эти зависимости используются в Star-CCM+ и Fluent для модификации логарифмического закона стенки по выражению (1) с учетом влияния шероховатости. В таблице приведены функции, заложенные в расчетный алгоритм обоих CFD-решателей.

Как видно из таблицы, оба CFD-решателя используют эмпирическую константу C_s для определения дополнительного сопротивления поверхности в переходном режиме и режиме с полным проявлением шероховатости. Однако значение по умолчанию для этой константы в Star-CCM+ равно 0,253, во Fluent — $C_s = 0,5$. На рис. 3 графически представлена зависимость логарифма функции шероховатости f_r от величины K_s^+ в переходном режиме при установке значений коэффициентов $C_s = 0,5$ и $B = 1$ для обоих CFD-решателей. Анализ данных на рис. 3 показал, что оба решателя качественно и количественно приблизительно одинаково (относительная невязка составляет $-5 \div +15 \%$) оценивают влияние шероховатости стенок на логарифмический закон распределения скоростей внутри пограничного слоя.

Однако следует отметить, что, в соответствии с документацией к обоим CFD-пакетам, в решатели заложены свои

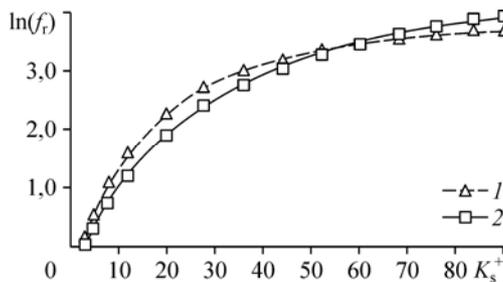


Рис. 3. Зависимость логарифма функции

шероховатости f_r от величины K_s^+

в переходном режиме.

1 — расчет в среде Star-CCM+,

2 — расчет в среде Fluent.

собственные встроенные инструменты для решения задач с ненулевой шероховатостью стенок. При больших значениях высоты шероховатости и малых значениях Y^+ логарифмическая функция распределения скорости потока внутри пограничного слоя стремится к неопределенности (см. рис. 2). В Star-CCM+ в этом случае используется встроенный механизм искусственного ограничения высоты шероховатости, который заключается в том, что, когда Y^+ стремится к нулю, решатель уменьшает высоту шероховатости. Тем самым в Star-CCM+ для оценки полного влияния шероховатости поверхности на логарифмический закон распределения скорости в пограничном слое необходимо соблюдать условие $Y^+ > K_s^+$, в противном случае решатель не позволит достоверно оценить влияние шероховатости. Такого рода ограничения приводят к необходимости использовать довольно грубые сетки и делают решения зависимыми от величины Y^+ . В свою очередь, для того чтобы избежать неопределенности функции при малых величинах Y^+ и больших высотах шероховатости (см. рис. 2), в пакете Fluent используется встроенный механизм виртуального сдвига стенки. Этот механизм основан на том предположении, что вязкий подслой полностью существует только в гидравлически гладком режиме течения (режим без проявления шероховатости). В переходном режиме течения элементы шероховатости немного выступают из вязкого подслоя, в результате ламинарный слой начинает «вымываться» пульсациями потока, возникающими в турбулентном подслое. Далее, при переходе к режиму с полным проявлением шероховатости вязкий (ламинарный) подслой полностью разрушается и влияние сил вязкости становится пренебрежимо малым.

На рис. 4 проиллюстрирована модель эквивалентной песочной шероховатости у стенки с одним слоем близко расположенных между собой сфер, замещающих техническую шероховатость с пиками и впадинами различных форм и размеров.

Механизм виртуального сдвига стенки, используемый во Fluent для моделирования шероховатости, заключается в корректировке величины Y^+ в соответствии со следующей зависимостью:

$$Y^+ = Y^+ + K_s^+ / 2. \quad (3)$$

Таким образом, величина Y^+ всегда остается больше на половину высоты безразмерной песочной шероховатости, в этой связи появляется возможность использовать для решения задач качественные детальные сетки.

На первом этапе настоящей работы проводились численные исследования газоструйного эжектора без учета шероховатости стенок, т.е. рассматривались гладкие стенки. В связи с тем, что исследуемая задача осесимметричная, для сокращения времени расчетов моделирование проводилось в осесимметричной двумерной постановке. Для расчетов во Fluent использовалась структурированная сетка с коэффициентом $Y^+ < 1,0$ и суммарным количеством элементов около 80 тыс. Для расчетов в среде Star-CCM+ применялась полигональная сетка с 30-ю рядами призматических элементов у стенок с коэффициентом $Y^+ < 1,0$ и суммарным количеством элементов около 300 тыс. Граничные условия и модели для обоих вариантов расчета были идентичными. Сопоставление с экспериментальными данными [4] показало хорошее согласование интегральных расчетных характеристик, выраженное через коэффициент инжекции (отношение массового расхода инжектируемого потока к массовому расходу рабочего потока). При этом погрешность составляла не более 5 % как для расчетов в среде Star-CCM+, так и в расчетах с использованием Fluent.

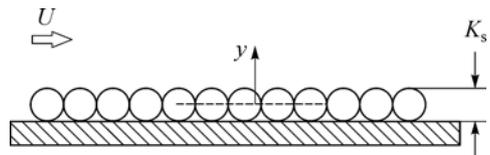


Рис. 4. Модель эквивалентной песочной шероховатости.

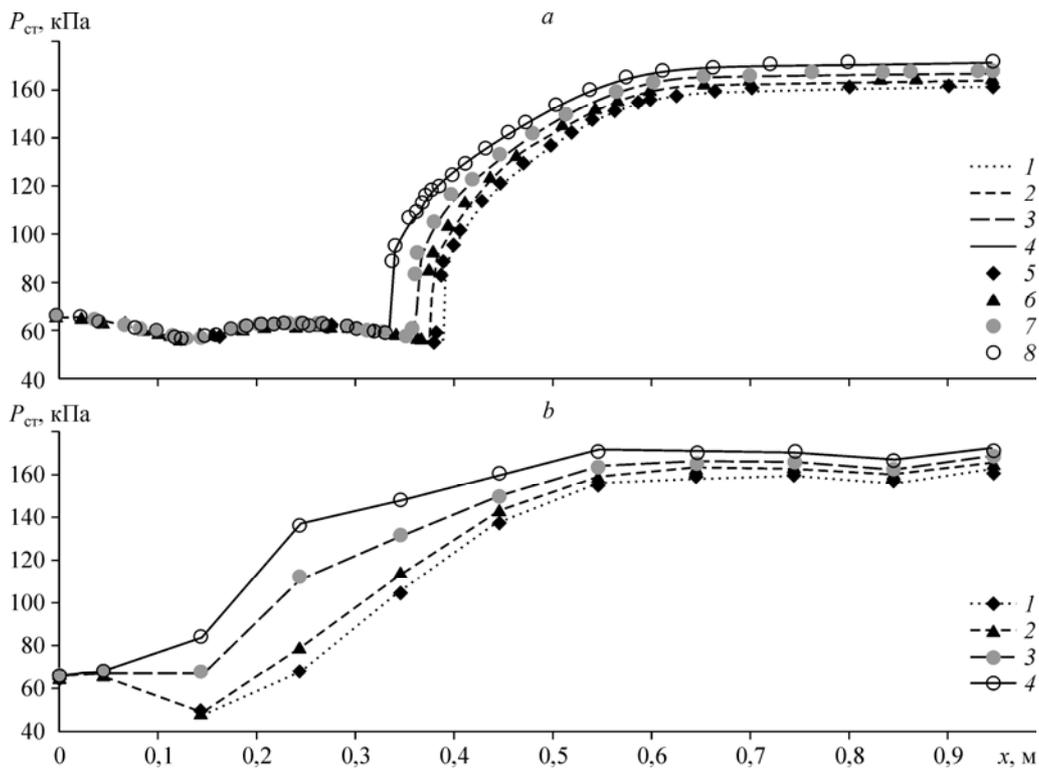


Рис. 5. Распределения статического давления вдоль стенки камеры смешения и диффузора для четырех величин противодействия.

a — результаты численных расчетов для гладких стенок в средах Star-CCM+ и Fluent:

1–4 — решатель Star-CCM+, 5–8 — решатель Fluent: $P_{ст} = 1,61$ (1, 5), 1,64 (2, 6), 1,67 (3, 7), 1,71 (4, 8);

b — результаты эксперимента: $P_{ст} = 1,61$ (1), 1,64 (2), 1,67 (3), 1,71 (4).

На рис. 5 приведено распределение статического давления вдоль стенки камеры смешения и диффузора по результатам численного моделирования (рис. 5*a*) и экспериментов (рис. 5*b*) для различных величин противодействия. Как видно из рис. 5*a*, профиль распределения статических давлений вдоль стенок по результатам численного моделирования для гладкой стенки у обоих CFD-решателей практически совпадает и при увеличении противодействия сечение, в котором наблюдается резкое возрастание статического давления (скачок давления), смещается вверх по потоку (с координаты $x = 0,385$ м к координате $x = 0,335$ м). В экспериментальных исследованиях электронные преобразователи давления устанавливались вдоль стенок камеры смешения и диффузора с одинаковым шагом. Это не позволило точно определить координату скачка давления на стенке. Необходимо отметить, что по результатам численных расчетов для гладкой стенки (рис. 5*a*) распределение статических давлений до скачка давления практически совпадают вне зависимости от величины противодействия, тогда как экспериментальные данные [4] показывают (рис. 5*b*), что по мере увеличения величины противодействия статическое давление у стенки практически в каждом характерном сечении от начала камеры смешения также увеличивается.

На втором этапе работы проводилось численное исследование при наличии шероховатости поверхностей рабочего сопла, камеры смешения и диффузора. При этом, с учетом особенностей вышеописанных подходов, используемых во Fluent и Star-CCM+ для моделирования шероховатости, сеточная модель для Star-CCM+ была перестроена следующим образом: коэффициент $Y^+ = 30-200$, суммарное количество элементов составляло

около 200 тыс.); сеточная модель для Fluent осталась без изменений. Для приведения в соответствие условий наложения шероховатости в разных решателях значения в Star-CCM+ по умолчанию для констант C_s и B были изменены на $C_s = 0,5$, $B = 1$ (см. табл.).

На рис. 6 представлены распределения статического давления (рис. 6a) и приведенной скорости инжектируемого потока (рис. 6b) вдоль стенок камеры смешения и диффузора по результатам эксперимента и численного моделирования во Fluent и Star-CCM+ для противодействия 1,67 бар. В процессе численного моделирования шероховатости стенок эжектора выяснилось, что профили распределений статического давления вдоль стенок у обоих CFD-решателей отличаются при одних и тех же высотах песочной шероховатости (рис. 6a). По мнению авторов, это связано с использованием различных подходов и сеток в Star-CCM+ и Fluent для моделирования шероховатости. Однозначно судить о том, какой CFD-решатель дает более согласованные с экспериментом данные, сложно, т.к. сама высота эквивалентной песочной шероховатости, как правило, в несколько раз отличается от измеренной профилометром среднеквадратичной или среднеарифметической технической шероховатости. Среднеарифметическое значение технической шероховатости, полученное в ходе измерений контактными профилометром на экспериментальном струйном аппарате, составило $K_t^a = 4 \div 6$ мкм [4]. По различным источникам [17, 18] коэффициент преобразования технической в эквивалентную песочную шероховатость может изменяться в пределах $K_s = (3 \div 6) \cdot K_t$. Таким образом, для определения коэффициента преобразования измеренной величины технической шероховатости элементов эжектора к значению эквивалентной песочной шероховатости требуются дополнительные исследования.

Анализ результатов численных экспериментов показал, что влияние шероховатости стенки эжектора на зависимость распределения статического давления вдоль стенки имеет немонотонный характер. При малой шероховатости распределение давления соответствует предельному режиму работы эжектора. При достижении критической шероховатости эжектор переходит на допредельный режим; соответственно резко изменяется профиль (распределение) давления вдоль стенки проточной части эжектора.

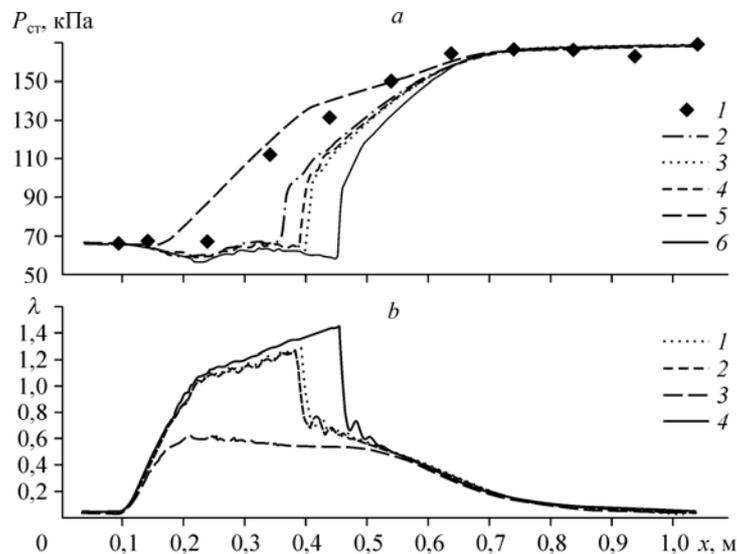


Рис. 6. Распределения статического давления вдоль стенок эжектора и приведенной скорости инжектируемого потока по длине пароструйного аппарата при давлении $P_{\text{cond}} = 1,67$ бар.

a — статическое давление: эксперимент (1), решатель Fluent при $K_s = 20$ мкм (2), решатель Star-CCM+ при $K_s = 20$ (3), 32 (4), 34 (5) мкм, численный расчет для гладкой стенки (6);
b — приведенная скорость: решатель Star-CCM+ при $K_s = 20$ (1), 32 (2), 34 (3) мкм, численный расчет для гладкой стенки (4).

На рис. 6а видно, что по результатам расчетов с использованием Fluent на гладкой стенке скачок давления возникает при $x = 0,45$ м, а при высоте шероховатости $K_s = 20$ мкм — при $x = 0,35$ м. При расчете в Star-CCM+ при высоте шероховатости $K_s = 20$ мкм скачок давления возникает в сечении $x = 0,4$ м, а при $K_s = 32$ мкм, скачок наблюдается в области $x = 0,36$ м. Эти данные свидетельствуют о качественном согласовании результатов расчетов. При увеличении высоты песочной шероховатости сечение, в котором возникает скачок давления, смещается вверх по потоку (ближе к рабочему соплу). Интегральный коэффициент инжекции изменяется незначительно (в пределах 5 %), при этом эжектор работает на предельном (on-design) режиме.

Из рис. 6а и 6б видно, что для одной и той же высоты песочной шероховатости сечение, в котором возникает скачок давления, совпадает с сечением резкого снижения приведенной скорости инжектируемого потока. В этом сечении скорость потока резко снижается до величин меньших скорости звука. При высоте шероховатости стенки $K_s = 0 \div 32$ мкм расчетные величины массовых расходов рабочего и инжектируемого потоков удовлетворительно (с погрешностью от 3 до 15 %) согласуются с экспериментальными данными. Как видно на рис. 5а, когда высота песочной шероховатости составляет $K_s = 34$ мкм (расчет в среде Star-CCM+) возрастание давления становится более пологим. Сопоставление с данными на рис. 6б свидетельствует о том, что эжектор переходит на допредельный (off-design) режим работы. Инжектируемый поток не разгоняется до скорости звука, значение приведенной скорости инжектируемого потока не превышает 0,6. Интегральный коэффициент инжекции снижается на 30 %.

Численные исследования, проведенные при высоте песочной шероховатости $K_s > 34$ мкм показали аналогичной (как и для $K_s = 34$ мкм) характер распределений давления на стенке эжектора, соответствующий также допредельному режиму его работы. Полученные данные о распределениях давления вдоль стенки проточной части эжектора, скачкообразном повышении давления при переходе от предельного к допредельному режиму работы качественно согласуются с результатами работы [19].

Таким образом, авторы считают, что для элементов проточной части струйного аппарата эжектора существует критическая величина шероховатости. Если высота шероховатости стенки меньше критической, то при заданных граничных условиях и геометрии проточной части эжектора коэффициент инжекции близок к расчетному для гладких стенок, т.е. шероховатость поверхности стенок не оказывает существенного негативного влияния на работу струйного аппарата эжектора. Если значение шероховатости превышает критическую величину для заданных условий и геометрии, то эжектор переходит на допредельный режим и коэффициент инжекции резко уменьшается. Необходимо отметить, что при увеличении высоты шероховатости профиль распределения статического давления до сечения, в котором возникает скачок давления, имеет тенденцию к повышению. Таким образом, шероховатость сказывается не только на положении сечения, где возникает скачок давления, но и на потоке в области до скачка. Это качественно согласуется с экспериментальными данными, представленными на рис. 5б.

По мнению авторов, влияние шероховатости стенок на газодинамику процессов в сверхзвуковом эжекторе можно сравнить с влиянием противодавления (давления в охладителе). Известно [1], что по мере увеличения противодавления область расчетного режима работы эжектора сужается. Логично предположить, что и по мере увеличения высоты шероховатости внутренних стенок потери энергии, связанные с поверхностным трением, возрастают, а значит увеличивается и величина полных потерь, снижая тем самым величину предельного (максимального) давления, которое может создать эжектор

за диффузором. В результате происходит сокращение рабочей (расчетной) области эжектора. Этот вывод подчеркивает необходимость высокотехнологичного процесса изготовления деталей эжектора, работающего на предельных — сверхзвуковых — режимах. Потери на трение о стенки обычно не являются самыми большими в объеме полных потерь эжектора, наибольшие потери возникают от скачков давления и в процессе перемешивания двух сред. Согласно работе [4], относительно невысокие затраты на полировку поверхностей сопла, камеры смешения и диффузора могут дать значительный выигрыш в такой характеристике эжектора, как длина его рабочей области.

Выводы

Проведено сравнительное исследование влияния шероховатости поверхностей на логарифмический закон распределения скоростей внутри пограничного слоя в двух коммерческих CFD-решателях (Star-CCM+ и Fluent). Результаты численных расчетов эжектора с гладкими стенками в обоих CFD-решателях имеют хорошее качественное и количественное согласование как по среднеинтегральным характеристикам, так и по распределению локальных параметров потока.

Установлено, что при возрастании противодавления эжектора и шероховатости поверхности, сечение, где возникает скачок давления, смещается вверх по потоку (к рабочему соплу); при этом скачок давления сопровождается резким снижением скорости инжектируемого потока.

Результаты численных расчетов эжектора с шероховатыми стенками проточных частей эжектора качественно согласуются с экспериментальными данными. Также расчеты эжектора с шероховатыми стенками в обоих CFD-решателях хорошо согласуются между собой количественно по среднеинтегральным характеристикам и качественно — по локальным характеристикам потока. Имеющие место расхождения в локальных профилях распределения давлений вдоль стенок эжектора связаны с использованием различных сеток и подходов к разрешению пограничного слоя в законе логарифмического распределения скоростей в Star-CCM+ и Fluent для моделирования шероховатости.

Установлено, что в случае превышения критической высоты шероховатости для заданных граничных условий и геометрии проточной части эжектора последний переходит на допредельный режим работы и его производительность значительно снижается. Переход на этот режим сопровождается резким изменением профилей распределения статического давления вдоль стенки проточной части эжектора.

Список литературы

1. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
2. Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 408 с.
3. ESDU № 86030. Ejectors and jet pumps. Design for steam driven flow. 1986.
4. Mazzelli F., Milazzo A. Performance analysis of a supersonic ejector cycle working with R245fa // Int. J. of Refrigeration. 2015. Vol. 49. P. 79–92.
5. Menter F., Ferreira J.C., Esch T., Konno B. The SST turbulence model with improved wall treatment for heat transfer predictions in gas turbines // Proc. of the Int. Gas Turbine Congress. Tokyo, 2003. P. 1–7.
6. Bartosiewicz Y., Aidoun Z., Desevaux P., Mercadier Y. CFD-experiments integration in the evaluation of six turbulence models for supersonic ejectors modeling // Conf. Proc., Integrating CFD and Experiments, Glasgow, UK, 2003. P. 561–566.
7. Bartosiewicz Y., Aidoun Z., Desevaux P., Mercadier Y. Numerical and experimental investigations on supersonic ejectors // Int. J. Heat Fluid Flow. 2005. No. 26. P. 56–70.
8. Colonna P., Harincks S., Rebay S., Guardone A. Real-gas effects in organic rankine cycle turbine nozzles // J. of Propulsion and Power. 2008. Vol. 24, No. 2. P. 282–294.

9. **Lujan L.M., Serrano R., Dolz V., Sanchez J.** Model approximation to an equation of state for the R245fa fluid in an expansion process // *J. Applied Thermal Engng.* 2012. Vol. 40. P. 248–257.
10. **NIST Chemistry** WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69. 2003 <http://www.webbook.nist.gov/chemistry>.
11. **Knopp T., Eisfeldt B., Calvo J.B.** A new extension for $k-\omega$ turbulence models to account for wall roughness // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2009. Vol. 30. P. 54–65.
12. **CD-Adapco** Star-SSM+ documentation help.
13. **Ansys Fluent** documentation help.
14. **Nikuradse J.** *Laws of Flow in Rough Pipes.* NACA, Washington, 1950. Technical Memorandum 1292.
15. **Шлихтинг Г.** *Теория пограничного слоя.* М.: Наука, 1974. 712 с.
16. **Себеси Т., Bradshaw P.** *Momentum transfer in boundary layers.* N.Y.: Hemisphere Publishing Corporation, 1977. 391 p.
17. **Adams T., Grant C., Watson H.** A simple algorithm to relate measured surface roughness to equivalent sand-grain roughness // *Int. J. Mech. Eng. Mechatron.* 2012. No. 1. P. 66–71.
18. **Zagarola M.V., Smits A.J.** Mean-flow scaling of turbulent pipe flow // *J. Fluid Mech.* 1998. Vol. 373. P. 33–79.
19. **Соболев А.В., Запрягаев В.И., Мальков В.М.** Одноступенчатый эжектор большой степени сжатия // *Теплофизика и аэромеханика.* 2015. Т. 12, № 1. С. 49–58.

*Статья поступила в редакцию 31 марта 2016 г.,
после доработки — 3 августа 2016 г.*