

УДК 533.697.24:533.6.011.72:519.633

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЕМ В ПРОСТРАНСТВЕННОМ ВОЗДУХОЗАБОРНИКЕ ЛЕГКОГО СВЕРХЗВУКОВОГО САМОЛЕТА БИЗНЕС КЛАССА RANS/ILES-МЕТОДОМ

© 2019 г. И. В. Кукшинова<sup>1</sup>, Д. А. Любимов<sup>1</sup> \*, А. А. Соловьева<sup>1</sup>, А. Э. Федоренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП Центральный институт авиационного моторостроения  
им. П.И. Баранова, Москва, Россия

\*E-mail: lyubimov@ciam.ru

Поступила в редакцию 20.05.2017 г.

После доработки 16.10.2017 г.

Принята к печати 26.12.2017 г.

С помощью комбинированного RANS/ILES-метода (Reynolds Averaged Navier–Stokes – RANS, Implicit Large Eddy Simulation – ILES) высокого разрешения исследовано влияние системы слива пограничного слоя на течение и характеристики пространственного воздухозаборника сверхзвукового самолета бизнес класса, интегрированного с имитатором планера самолета. Рассмотрены два варианта геометрии: с системой слива пограничного слоя и без нее. Для обоих вариантов воздухозаборника исследовано влияние газодинамического управления течением с помощью синтетических струй. Установлено влияние системы слива пограничного слоя и режимных параметров синтетических струй на течение в воздухозаборнике и его характеристики, уровень турбулентных пульсаций и границу помпажа. Установлено, что у воздухозаборника без системы слива ниже уровень пульсаций скорости и давления на выходе. Применение синтетических струй позволяет уменьшить потери полного давления, снизить уровень турбулентных пульсаций в канале и на выходе из воздухозаборника, увеличить диапазон его устойчивой работы.

DOI: 10.1134/S0040364419010320

### ВВЕДЕНИЕ

Для современных сверхзвуковых пассажирских самолетов характерна интеграция силовой установки с планером летательного аппарата [1]. Как правило, рассматриваются силовые установки, расположенные в хвостовой части планера или на крыле. Такое расположение благоприятно с точки зрения экологии: оно дает возможность уменьшить шум от силовой установки при взлете и посадке самолета. Однако близкое расположение воздухозаборника (ВЗ) к планеру самолета приводит к тому, что на вход ВЗ попадает толстый пограничный слой, который образовался на элементах планера. В результате возникает большая неравномерность в распределении параметров течения и турбулентности по высоте канала ВЗ. Кроме того, толстый пограничный слой легче отрывается при взаимодействии с замыкающим скачком уплотнения, что дополнительно ухудшает характеристики ВЗ. Так, в работе [2] у пространственного ВЗ сверхзвукового самолета бизнес класса (ССБК), интегрированного с имитатором планера, отмечено ухудшение характеристик по сравнению с изолированным ВЗ, а также возникновение помпажа, которого не было у изолированного ВЗ при том же дросселировании. Опи-

санные особенности течения в ВЗ ССБК делают актуальной задачу исследования влияния системы слива на течение в нем, а также способов улучшения характеристик ВЗ, интегрированного с планером самолета.

Традиционным способом улучшения характеристик течения в ВЗ и уменьшения неравномерности течения на выходе из него является использование системы слива пограничного слоя. Она позволяет частично или полностью удалить пограничный слой, образовавшийся на поверхностях, на которых происходит торможение потока в сверхзвуковых ВЗ. Это дает возможность снизить потери полного давления и неравномерность течения на выходе из ВЗ, поскольку уменьшается доля пограничного слоя с пониженным уровнем полного давления на выходе из ВЗ. Кроме того, расширяется диапазон устойчивой работы ВЗ и увеличиваются противопомпажные запасы, поскольку тонкий пограничный слой с наполненным профилем более устойчив к отрыву. Но применение систем слива пограничного слоя имеет и свои отрицательные черты. Прежде всего, уменьшается расход воздуха, поступающего в двигатель, поэтому расход воздуха через систему слива делается минимальным. При использова-

нии системы слива, в которую пограничный слой попадает через щель на стенке канала ВЗ, могут возникать пульсации давления большой амплитуды при взаимодействии турбулентного слоя смещения на границе с основным потоком в канале ВЗ с задней кромкой щели в полости для слива пограничного слоя [3]. Для пассажирского самолета это может служить источником дополнительных вибраций и шума в салоне.

Во многих технических устройствах для снижения неравномерности течения, улучшения наполненности пограничного слоя, уменьшения или устранения отрыва часто используются генераторы вихрей [4]. Однако они всегда воздействуют на течение, даже в тех случаях, когда в этом нет необходимости. Применение газодинамических способов управления, таких, как вдув или отсос воздуха в пристеночных областях [5], пульсирующий вдув [6], позволяет использовать эти средства в случае необходимости, кроме того, имеется возможность регулировать степень их воздействия на течение. Но при использовании подобных способов управления течением требуется специальное рабочее тело, магистрали для его подвода или удаления. Перспективным является использование систем с нулевым суммарным расходом рабочего тела – так называемых синтетических струй [7] (от английского *synthetic jet*). Применительно к течениям в элементах ТРД можно указать работы [8–10], в которых продемонстрирована эффективность применения синтетических струй для устранения отрыва и улучшения характеристик течения в межтурбинных диффузорах ТРД. Синтетические струи обычно используются при дозвуковых скоростях основного течения. Примеров применения синтетических струй для управления сверхзвуковыми течениями меньше. В этом случае синтетические струи часто создаются с помощью электрического разряда [11] или при использовании плазменных актуаторов [12]. В упомянутых работах продемонстрирована эффективность применения синтетических струй для уменьшения отрывных зон, вызванных взаимодействием скачков уплотнения с пограничным слоем.

При численном исследовании течений, в которых большую роль играют турбулентные явления, в частности в сверхзвуковом ВЗ на дроссельных и помпажных режимах, эффективно использовать методы, в которых турбулентные вихри описываются явным образом. Так, в работе [13] с помощью метода DDES (Delayed Detached Eddy Simulation) [14] был исследован помпаж сверхзвукового ВЗ. Точность расчетов была выше, чем у методов RANS. Авторами [15] для этого ВЗ были выполнены расчеты RANS/ILES-методом [16]. Применение ILES вместо традиционного LES с явной подсеточной моделью дало возможность использовать монотонную разностную схему девятого порядка [17] для вычисления параметров

на гранях расчетных ячеек, что обеспечило высокую точность расчетов сложных сверхзвуковых течений с разрывами. Подтверждением этого может служить работа [15], где расчеты проводились при различном дросселировании ВЗ, включая помпажные режимы, для разных чисел Маха набегающего потока. Было получено хорошее совпадение с доступными экспериментальными данными во всех исследованных режимах.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния системы слива пограничного слоя и синтетических струй на течение в пространственном сверхзвуковом ВЗ ССБК, интегрированном с имитатором планера [18], с помощью RANS/ILES-метода [16]. Рассмотрено два варианта ВЗ: с системой слива пограничного слоя и без нее. Определено влияние системы слива на границу начала помпажа. В обоих случаях исследовано влияние режимных параметров синтетических струй на течение и уровень турбулентных пульсаций на выходе из ВЗ. Получены дроссельные характеристики и зависимости уровня турбулентных пульсаций скорости и статического давления от степени дросселирования ВЗ для всех исследованных вариантов.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Общий вид пространственного ВЗ ССБК, интегрированного с планером самолета, представлен на рис. 1. Рассмотренный ВЗ был снабжен окнами для перепуска воздуха 4 на боковых щеках. В зависимости от варианта геометрии он мог быть оборудован системой слива пограничного слоя 6.

При расчетах в качестве имитатора планера была использована V-образная пластина, установленная перед ВЗ. Длина пластины составляла  $3.53h_i$ , где  $h_i$  – высота входа в ВЗ, угол раствора сторон пластины –  $120^\circ$  и ее ширина –  $1.86h_i$ . Такая геометрия соответствовала исследованной экспериментально в [18]. Для того чтобы изменить расход воздуха через ВЗ, к выходному сечению его диффузора было пристыковано сопло

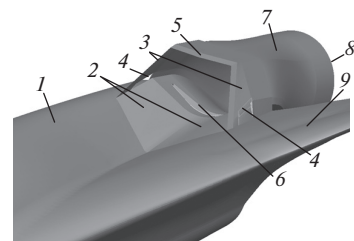


Рис. 1. Вид в изометрии носовой части ССБК (повернуто) с входным устройством: 1 – фюзеляж, 2 – поверхности торможения ВЗ, 3 – боковые стенки, 4 – окна перепуска воздуха, 5 – передняя кромка обечайки, 6 – щель слива пограничного слоя в горле ВЗ, 7 – дозвуковой диффузор, 8 – выходное сечение ВЗ, 9 – крыло ЛА.

Лавая, подобно тому как это было сделано в работе [15]. Диаметр его критического сечения  $S_c$  определял режим течения в ВЗ. В ходе расчетов варьировалась величина  $TR$ , которая определялась как  $TR = 1 - S_c/S_{out}$ , где  $S_{out}$  – площадь выходного сечения ВЗ. При  $TR = 0$  сечение ВЗ в горле сопла Лавая полностью открыто, при  $TR = 1$  – закрыто. Вычисления проводились для расчетного числа Маха набегающего потока  $M_0 = 1.8$ . На входной границе расчетной области задавались полные параметры потока, которые соответствовали статическому давлению  $p_{st} = 30$  кПа и статической температуре  $T_{st} = 172$  К. Число Рейнольдса, вычисленное по высоте входа в ВЗ  $h_i$  и скорости набегающего потока, равнялось  $Re = 1.17 \times 10^6$ . Высота критического сечения сопла выходного тракта системы слива была  $H_{bleed} = 0.05h_i$ . Полная постановка граничных условий, которые были использованы при расчете ВЗ, описана в статье [15]. Все расчеты выполнялись на криволинейной неортогональной многоблочной сетке с общим числом ячеек  $5.75 \times 10^6$ . Сетка была сгущена к стенкам ВЗ и кромкам щек, окнам системы перепуска воздуха, щели системы слива пограничного слоя и щелям для выхода синтетических струй. В продольном направлении наиболее мелкая сетка располагалась в сверхзвуковой части ВЗ. Вне ВЗ, где не требуется высокой точности, была использована сетка с крупными ячейками.

При расчетах ВЗ с синтетическими струями течение в полости генератора синтетических струй не моделировалось. Использовался упрощенный подход [8]: на части стенки ВЗ, соответствующей щелям для выхода синтетических струй, задавалась нормальная к поверхности компонента скорости, величина которой менялась по гармоническому закону. Частота и амплитуда соответствовали параметрам синтетических струй. В работе [10] показано, что такой подход обеспечивает приемлемую точность моделирования синтетических струй. Четыре щели для выхода синтетических струй (две пары по две струи в каждой) располагались на поверхности торможения. Длина одной щели составляла  $0.63h_i$ , а ширина –  $0.022h_i$ . Начало щелей находилось при  $X/h_i = 0.4$ . Расстояние между центрами щелей внутри пары было  $0.16h_i$ , между ближайшими струями из разных пар –  $0.32h_i$ . В ходе расчетов варьировались режимные параметры синтетических струй: амплитуда  $q$  составляла 50, 100 и 150 м/с, частота  $f = 200$  Гц. Эффективный суммарный коэффициент импульса синтетических струй  $c_{\mu}$  равнялся 0.018, 0.07 и 0.16% соответственно. Были также выполнены расчеты для варианта синтетических струй с  $q = 100$  м/с и  $f = 300$  Гц.

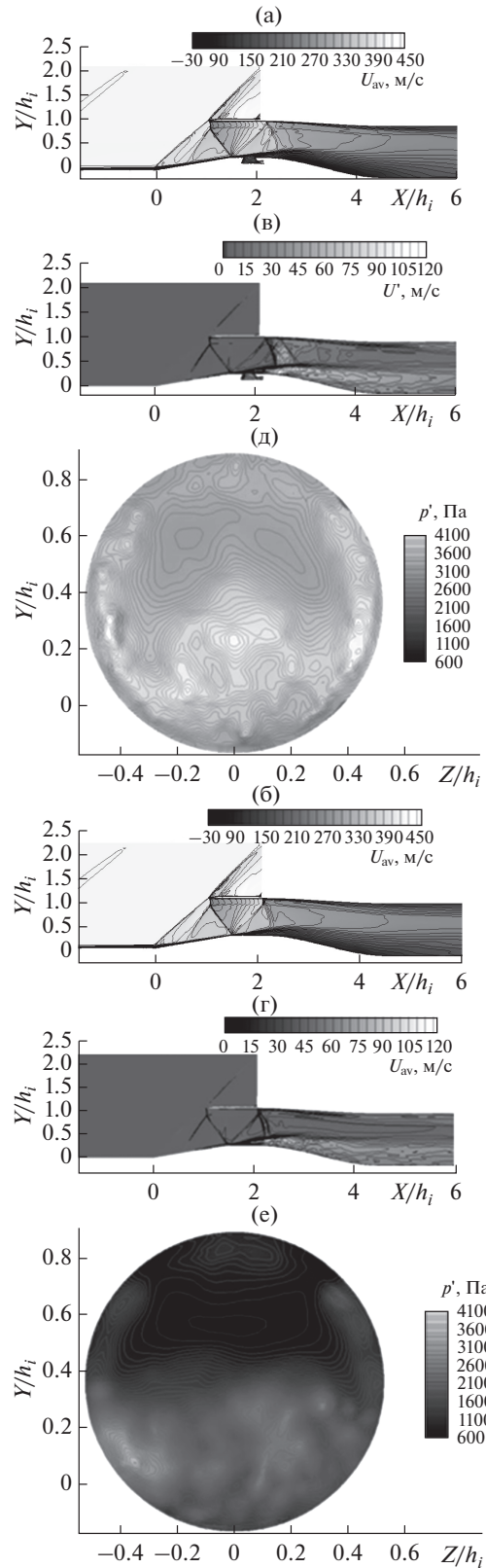
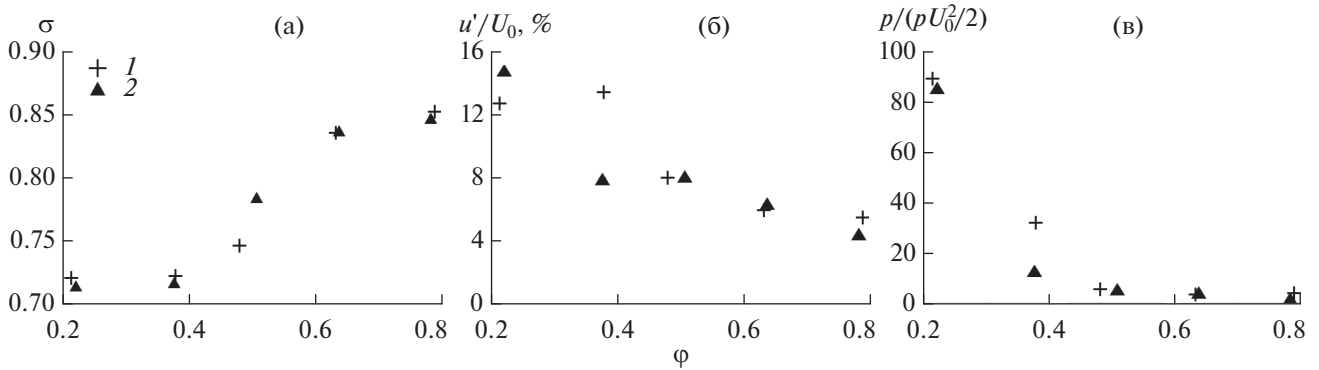


Рис. 2. Поля осредненной продольной скорости и пульсаций продольной скорости в сечении  $Z = 0$  и пульсаций статического давления на выходе из ВЗ при  $X/h_i = 5.17$  для  $TR = 0.2$ : (а), (в), (д) – ВЗ с системой слива; (б), (г), (е) – без нее.



**Рис. 3.** Влияние системы слива и степени дросселирования на характеристики течения и уровни турбулентных пульсаций на выходе из ВЗ при  $X/h_i = 5.17$ : (а) – дроссельная характеристика; (б), (в) – уровень пульсаций скорости и статического давления; 1 – ВЗ с системой слива, 2 – без нее.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Вначале было исследовано влияние системы слива пограничного слоя на характеристики ВЗ с имитатором планера. На рис. 2 показаны поля параметров течения и турбулентности в продольном сечении и на выходе из ВЗ для обоих вариантов геометрии в рабочем режиме при  $TR = 0.2$ . На рис. 2а и 2б видно, что у ВЗ без системы слива отрывная область на нижней стенке, которая образуется при взаимодействии пограничного слоя с замыкающим скачком уплотнения, меньше. Положение замыкающего скачка уплотнения в варианте ВЗ без системы слива более стабильно, ниже уровень пульсаций скорости (рис. 2в, 2г) и пульсаций статического давления около нижней стенки диффузора ВЗ. В результате меньше уровень турбулентных пульсаций параметров течения на выходе из ВЗ ( $X/h_i = 5.17$ ). Это можно видеть на рис. 2д и 2е, где показаны поля пульсаций статического давления в этом сечении для обоих вариантов ВЗ.

На рис. 3 представлены характеристики течения и турбулентности на выходе из ВЗ в зависимости от степени дросселирования для обоих вариантов геометрии ВЗ. Видно, что на уровень  $\sigma$  система слива влияет слабо: в рабочем режиме значение  $\sigma$  незначительно выше – 0.853 против 0.846 для ВЗ без системы слива пограничного слоя. Более заметно влияние системы слива на уровень осредненных по площади выходного сечения ВЗ пульсаций скорости 5.5 и 4.5% и пульсаций статического давления 4 и 2% соответственно. Причина повышенного уровня турбулентных пульсаций у ВЗ с системой слива объяснена во Введении. Здесь и далее при представлении в безразмерном виде пульсации скорости отнесены к скорости набегающего потока, а пульсации статического давления – к скоростному напору набегающего потока, выражены в процентах.

Было исследовано влияние синтетических струй на течение в ВЗ с имитатором планера и си-

стемой слива пограничного слоя. Анализ результатов расчетов показал, что на рабочих режимах синтетические струи уменьшают или устраняют отрыв пограничного слоя на входе в ВЗ, возникающий при взаимодействии замыкающего скачка уплотнения с пограничным слоем. Для  $TR = 0.2$  эффективны струи с параметрами  $q = 100$  м/с,  $f = 300$  Гц. При этом изменяется структура скачков уплотнения, в которых происходит торможение потока: торможение потока для ВЗ со струями происходит на меньшем расстоянии, чем в исходном ВЗ, и с меньшими потерями. Это можно видеть при сравнении рис. 4а и 4б. Без синтетических струй положение замыкающего скачка уплотнения было нестационарным вследствие взаимодействия его с пограничным слоем. Синтетические струи изменили профиль скорости в пограничном слое, сделали его более устойчивым, в результате отрыв при взаимодействии со скачком стал значительно меньше, а колебания скачка уплотнения практически пропали, улучшились параметры течения и уменьшился уровень турбулентных пульсаций на выходе из ВЗ (рис. 4в и 4г).

При степени дросселирования  $TR = 0.35$  наиболее эффективными оказались струи с параметрами  $q = 150$  м/с,  $f = 200$  Гц. Как и в предыдущем случае, синтетические струи меняют картину течения в канале ВЗ, другим становится характер торможения потока – короче область, в которой происходит торможение потока. Уменьшается уровень пульсаций давления в канале и на выходе из ВЗ. В выходном сечении ВЗ при режимах дросселирования  $TR = 0.2$  и  $0.35$  синтетические струи снижают уровень осредненных по площади сечения пульсаций скорости на 20 и 25%. Пульсации давления снижаются на 47 и 38% соответственно.

При увеличении дросселирования эффективность синтетических струй возрастает. На рис. 5 представлены обобщающие результаты по влиянию синтетических струй на характеристики ВЗ с



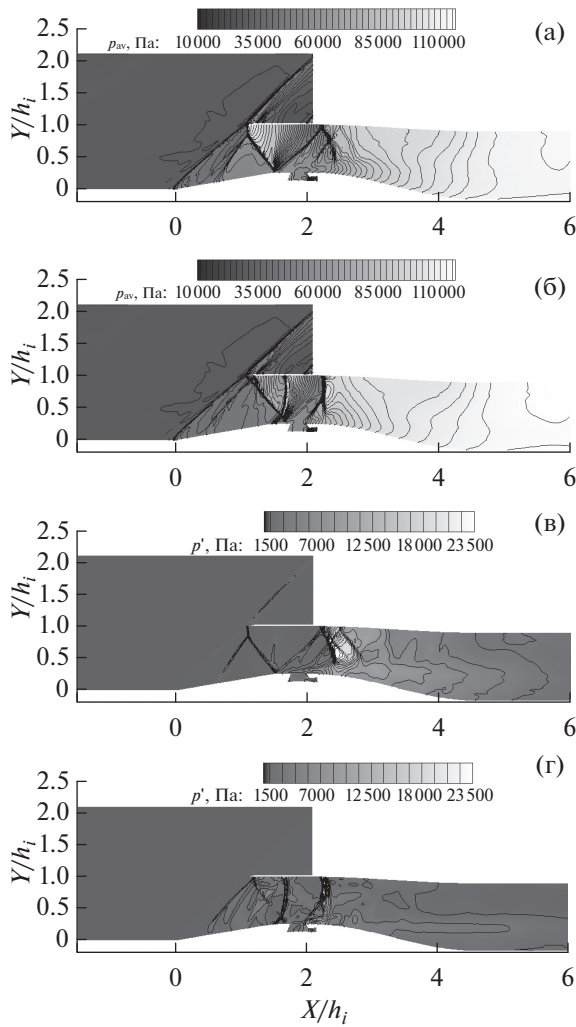


Рис. 4. Поля осредненного статистического давления и пульсаций давления в сечении  $Z=0$  при  $TR=0.2$ ; (а), (в) – без струй; (б), (г) – со струями,  $q=100$  м/с,  $f=300$  Гц.

ным свойством синтетических струй является то, что они увеличивают коэффициент расхода по сравнению с вариантом ВЗ без синтетических струй при неизменном  $TR$ . Кроме того, они позволили отодвинуть границу начала помпажа: при  $TR=0.55$  удалось снизить пиковые значения пульсаций давления на выходе из ВЗ на 63%, а пульсаций скорости почти на 40%. В табл. 1 приведены количественные данные по влиянию параметров синтетических струй на течение в ВЗ с системой слива для всех исследованных режимов. В первой колонке таблицы указано значение степени дросселирования  $TR$ , во второй и третьей – режимные параметры синтетических струй  $q$  и  $f$ , в четвертой – коэффициент расхода на выходе ВЗ  $\phi$ , в пятой – коэффициент  $\sigma$ , в шестой и седьмой – уровни пульсаций скорости и статического давления на выходе из ВЗ, в восьмой – коэффициент расхода через систему слива  $\phi_{\text{bleed}}$ , в девятой – суммарный коэффициент импульса синтетических струй  $c_{\mu}$ .

В заключительной серии расчетов было исследовано влияние синтетических струй на течение в ВЗ с имитатором планера без системы слива пограничного слоя.

На рис. 6 показаны поля осредненной скорости и пульсаций скорости в продольном сечении ВЗ без системы слива для варианта с синтетическими струями с  $q=50$  м/с,  $f=200$  Гц в сравнении с ВЗ без струй при  $TR=0.2$ . Как и для ВЗ с системой слива, синтетические струи уменьшают отрывную зону на нижней стенке, которая возникает при взаимодействии пограничного слоя с замыкающим скачком уплотнения (рис. 6а и 6б). Кроме того, они снижают уровень пульсаций скорости и статического давления в окрестности зон взаимодействия скачков уплотнения с пограничным слоем в диффузоре ВЗ. Это видно при сравнении рис. 6в и 6г. Заметно влияние на уровень и распределения турбулентных пульсаций скорости, а также пульсаций статического давления в выходном сечении ВЗ синтетические

системой слива пограничного слоя. Видно, что при всех исследованных режимных параметрах синтетических струй  $\sigma$  возрастает. Положитель-

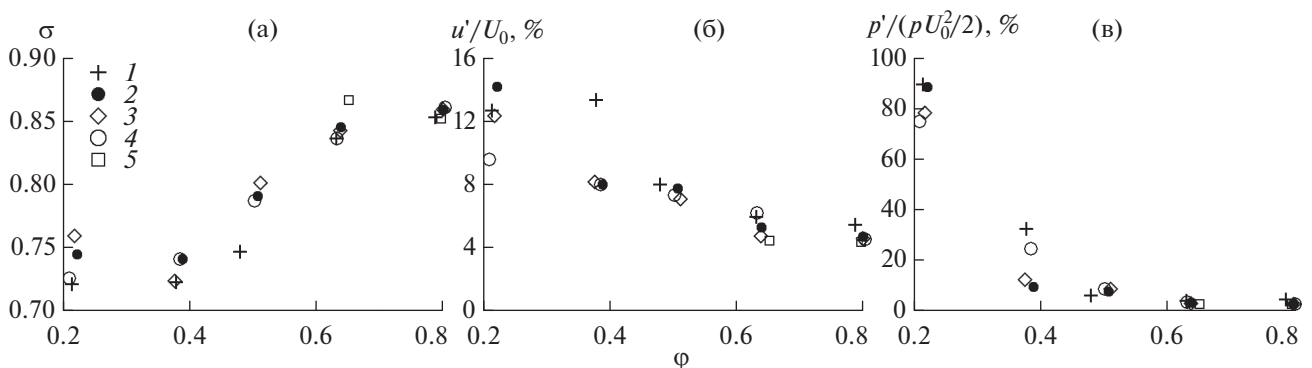
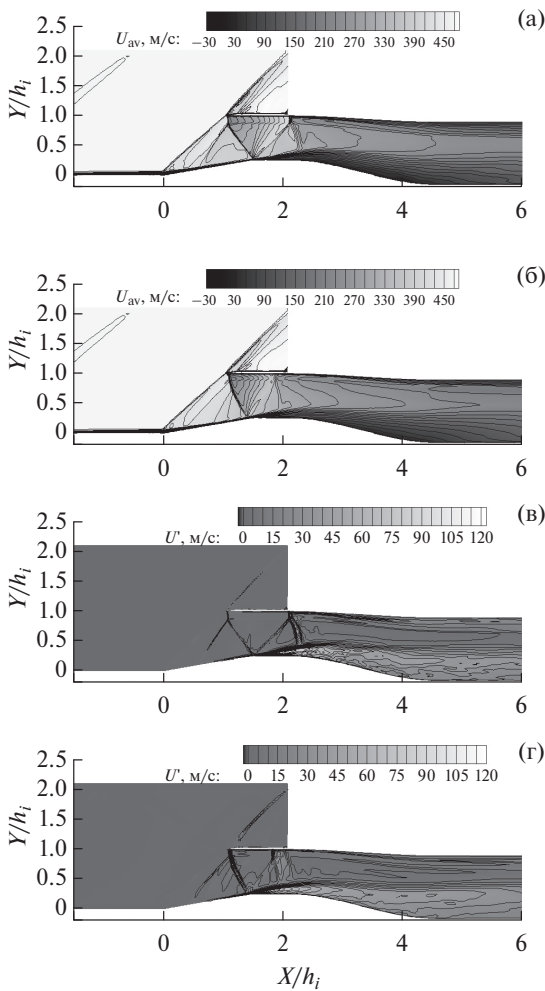


Рис. 5. Влияние режимных параметров синтетических струй и степени дросселирования на характеристики течения и уровни турбулентных пульсаций ВЗ с системой слива при  $X/h_i=5.17$ : (а) – дроссельная характеристика; (б), (в) – уровень пульсаций скорости и статического давления; 1 – без струй; 2 –  $q=50$  м/с,  $f=200$  Гц; 3 – 100, 200; 4 – 100, 300; 5 – 150, 200.

**Таблица 1.** Влияние режимных параметров синтетических струй на характеристики ВЗ с системой слива при разном дросселировании

$TR$	$q$ , м/с	$f$ , Гц	$\varphi$	$\sigma$	$u'$ , %	$p'$ , %	$\Phi_{\text{bleed}}$	$c_{\mu}$ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.2	—	—	0.79	0.8523	5.47	4.12	0.0136	—
0.2	100	200	0.80	0.8587 (+0.749%)	4.56 (-16.6%)	2.28 (-44.7%)	0.0135	0.071
0.2	100	300	0.80	0.8603 (+0.939%)	4.52 (-17.3%)	2.25 (-45.4%)	0.0131	0.071
0.2	50	200	0.80	0.8585 (+0.722%)	4.69 (-14.3%)	2.20 (-46.7%)	0.0134	0.018
0.2	150	200	0.80	0.8515 (-0.089%)	4.37 (-20.1%)	2.37 (-42.4%)	0.0134	0.159
0.35	—	—	0.63	0.8359	5.95	3.50	0.0205	—
0.35	100	200	0.64	0.8421 (+0.741%)	4.75 (-20.3%)	2.47 (-29.2%)	0.0211	0.071
0.35	100	300	0.63	0.8360 (+0.006%)	6.21 (+4.3%)	3.08 (-11.9%)	0.0206	0.071
0.35	50	200	0.69	0.8444 (+1.017%)	5.28 (-11.3%)	2.84 (-18.7%)	0.0217	0.018
0.35	150	200	0.70	0.8658 (+3.576%)	4.45 (-25.3%)	2.18 (-37.6%)	0.0227	0.159
0.45	—	—	0.48	0.7468	8.00	5.67	0.0184	—
0.45	100	200	0.55	0.8009 (+0.741%)	7.08 (-11.5%)	8.23 (+45.2%)	0.0209	0.071
0.45	100	300	0.54	0.7869 (+0.006%)	7.32 (-8.6%)	8.28 (+46.1%)	0.0201	0.071
0.45	50	200	0.55	0.7903 (+1.017%)	7.76 (-3.1%)	7.11 (+25.5%)	0.0197	0.018
0.55	—	—	0.38	0.7226	13.35	32.06	0.0206	—
0.55	100	200	0.41	0.723878 (+0.182%)	8.16 (-38.9%)	12.01 (-62.5%)	0.0193	0.071
0.55	100	300	0.41	0.740833 (+2.467%)	8.02 (-39.9%)	24.20 (-24.5%)	0.0195	0.071
0.55	50	200	0.42	0.740791 (+2.797%)	8.00 (-40.0%)	9.00 (-71.9%)	0.0191	0.018
0.75	—	—	0.21	0.7211	12.66	89.02	0.0209	—
0.75	100	200	0.23	0.758983	12.35 (-2.5%)	77.80 (-12.6%)	0.0224	0.071
0.75	100	300	0.23	0.725861	9.59 (-24.2%)	74.41 (-16.4%)	0.0214	0.071
0.75	50	200	0.24	0.7446	14.17 (+11.9%)	87.97 (-1.2%)	0.0207	0.018



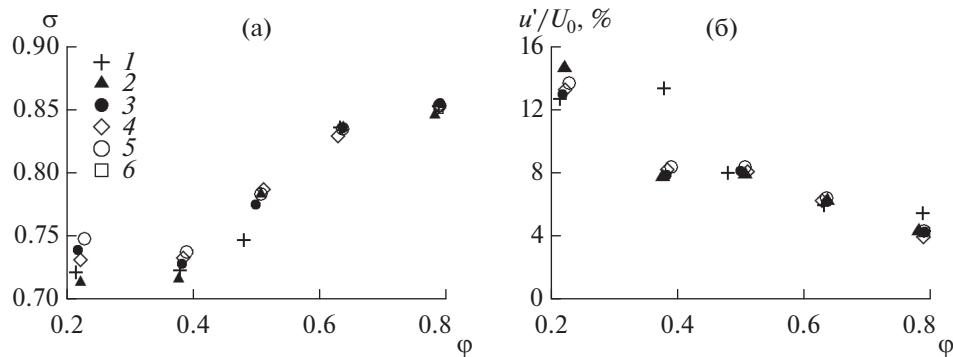
**Рис. 6.** Поля осредненной продольной скорости и пульсаций скорости в сечении  $Z = 0$  при  $TR = 0.2$ : (а), (в) – для варианта ВЗ без струй; (б), (г) – со струями,  $q = 50$  м/с,  $f = 200$  Гц.

струи с этими режимными параметрами не оказали. Для других режимных параметров синтетических струй при  $TR = 0.2$  получены сходные результаты.

При увеличении дросселирования до  $TR = 0.35$  отрывная зона начинается уже от носика ВЗ. Синтетические струи с параметрами  $q = 50$  м/с,  $f = 200$  Гц уменьшают размеры этой зоны и ее толщину, однако повышают уровень турбулентных пульсаций скорости в слое смешения между отрывной зоной и основным течением. Одновременно синтетические струи снижают уровень пульсаций статического давления в диффузоре ВЗ и на выходе из него.

При дальнейшем увеличении дросселирования ( $TR = 0.45$ ) синтетические струи несколько увеличивают уровень турбулентных пульсаций скорости и статического давления на выходе из диффузора ВЗ. Возможно, это связано не столько с режимными параметрами синтетических струй, сколько с положением щелей для их выхода. Согласно рекомендациям [9], они должны располагаться в начале отрывной зоны. В данном случае отрыв начинается уже на пластине перед входом в ВЗ, а щели расположены достаточно далеко от его начала.

На рис. 7 представлено влияние синтетических струй со всеми исследованными режимными параметрами на характеристики ВЗ без системы слива. Для сравнения на рисунках также показаны результаты для исходного ВЗ с системой слива пограничного слоя без синтетических струй. На рис. 7а видно, что в рабочем режиме синтетические струи увеличивают значение  $\sigma$ . Наилучший результат получен для синтетических струй с параметрами  $q = 50$  м/с,  $f = 200$  Гц. В этом случае  $\sigma = 0.855$ , у ВЗ с системой слива  $\sigma = 0.853$ . При увеличении дросселирования синтетические струи также повышают уровень  $\sigma$  на выходе из ВЗ: он становится больше, чем у ВЗ с системой слива. При этом в зависимости от степени дросселирования наиболее эффективными являются синтетические струи с различными режимными параметрами. Кроме того, как и для ВЗ с системой слива, синтетические струи увеличивают коэффициент расхода  $\phi$ . Это также видно на рис. 7.



**Рис. 7.** Влияние режимных параметров синтетических струй на характеристики ВЗ при  $X/h_i = 5.17$ : (а) – коэффициент восстановления полного давления  $\sigma$ , (б) – уровень пульсаций скорости; 1 – ВЗ со сливом, без струй; ВЗ без слива; 2 – без струй; 3 –  $q = 50$  м/с,  $f = 200$  Гц; 4 – 100, 200; 5 – 100, 300; 6 – 150, 200.

**Таблица 2.** Влияние режимных параметров синтетических струй на характеристики ВЗ без системы слива при разном дросселировании

$TR$	$q$ , м/с	$f$ , Гц	$\varphi$	$\sigma$	$u'$ , %	$p'$ , %	$c_{\mu}$ , %
0.2	—	—	0.78	0.8459	4.45	1.94	—
0.2	100	200	0.79	0.8530 (+0.829%)	3.94 (-11.4%)	2.11 (+9.1%)	0.071
0.2	100	300	0.79	0.8530 (+0.838%)	4.35 (-2.2%)	2.42 (+25.3%)	0.071
0.2	50	200	0.79	0.8549 (+1.058%)	4.27 (-3.9%)	2.03 (+4.9%)	0.018
0.2	150	200	0.79	0.8503 (+0.513%)	4.26 (-4.2%)	2.41 (+24.6%)	0.159
0.35	—	—	0.64	0.8356	6.36	4.23	—
0.35	100	200	0.63	0.8292 (-0.769%)	6.26 (-1.7%)	3.57 (-15.6%)	0.071
0.35	100	300	0.64	0.8348 (-0.096%)	6.41 (+0.7%)	3.15 (-25.4%)	0.071
0.35	50	200	0.64	0.8350 (-0.067%)	6.16 (-3.1%)	3.31 (-21.8%)	0.018
0.45	—	—	0.51	0.7829	8.06	5.75	—
0.45	100	200	0.51	0.7866 (+0.463%)	8.06 (+0.1%)	7.21 (+25.2%)	0.071
0.45	100	300	0.51	0.7829 (-0.002%)	8.37 (+3.8%)	7.09 (+23.2%)	0.071
0.45	50	200	0.50	0.7747 (-1.048%)	8.12 (+0.8%)	9.55 (+65.9%)	0.018
0.55	—	—	0.38	0.7158	7.88	12.95	—
0.55	100	200	0.38	0.7294 (+2.356%)	8.21 (+4.2%)	19.02 (+46.9%)	0.071
0.55	100	300	0.39	0.7374 (+3.028%)	8.38 (+6.4%)	29.79 (+130.0%)	0.071
0.55	50	200	0.38	0.7280 (+8.340%)	7.89 (+0.2%)	14.27 (+10.2%)	0.018
0.75	—	—	0.22	0.7134	14.75	85.38	—
0.75	100	200	0.22	0.7312 (+2.494%)	13.27 (-10.0%)	84.52 (-1.0%)	0.071
0.75	100	300	0.23	0.7475 (+4.779%)	13.68 (-7.3%)	84.12 (-1.5%)	0.071
0.75	50	200	0.22	0.7389 (+3.574%)	12.97 (-12.1%)	83.26 (-2.5%)	0.018

Влияние режимных параметров синтетических струй на уровень пульсаций скорости на выходе из ВЗ в зависимости от степени дросселирования представлено на рис. 7б. Можно видеть, что синтетические струи слабо влияют на уровень турбулентных пульсаций во всем диапазоне дросселирования, который был исследован. При этом в рабочем режиме синтетические струи несколько снижают уровень турбулентных пульсаций скорости. Наиболее эффективными оказались

синтетические струи с параметрами  $q = 100$  м/с,  $f = 200$  Гц.

Синтетические струи слабо влияли на уровень пульсаций статического давления на выходе из ВЗ. Во всем диапазоне дросселирования уровень пульсаций давления у ВЗ с синтетическими струями ниже, чем у ВЗ с системой слива.

Полная информация о количественном влиянии режимных параметров синтетических струй на характеристики и уровень турбулентных пуль-



саций на выходе ВЗ без системы слива приведена в табл. 2, которая имеет структуру, подобную табл. 1. Анализируя данные по влиянию синтетических струй на течение в ВЗ с системой слива пограничного слоя (табл. 1) и без нее (табл. 2), можно видеть, что в большинстве случаев синтетические струи позволяют улучшить характеристики ВЗ: увеличивается  $\sigma$  и снижаются пульсации скорости и статического давления. Наиболее заметно это у ВЗ с системой слива пограничного слоя. Влияние амплитуды синтетических струй неоднозначно: оно зависит от степени дросселирования ВЗ, а также от наличия системы слива. При  $TR = 0.2$  у ВЗ с системой слива синтетические струи с амплитудой 50–100 м/с и  $f = 200$  Гц увеличивают  $\sigma$  на 0.75%. При  $q = 150$  м/с происходит снижение  $\sigma$  на 0.1% по сравнению с базовым ВЗ без синтетических струй. При увеличении  $q$  с 50 до 150 м/с уровень пульсаций давления снижается от 47 до 42%, в то время как снижение уровня пульсаций скорости изменяется от 14 до 20%. У ВЗ без системы слива при том же дросселировании увеличение амплитуды струй с 50 до 150 м/с приводит к увеличению пульсаций статического давления с 5 до 25%, а пульсации скорости уменьшаются на 4%. При  $TR = 0.35$  для ВЗ с системой слива  $\sigma$  возрастает от 1 до 3.6%. Уровень пульсаций скорости и статического давления снижается на –11 и –25% и на –19 и –38% соответственно при увеличении  $q$  с 50 до 150 м/с. Для ВЗ без системы слива расчеты были проведены только для  $q$  50 и 100 м/с. Видно, что увеличение амплитуды синтетических струй приводит к уменьшению  $\sigma$  на 0.8% по сравнению с ВЗ без синтетических струй. При этом пульсации скорости снижаются на –3.1 и –1.7%, а пульсации давления – на –22 и –16% соответственно. Интересно проследить влияние частоты  $f$  при постоянной амплитуде и разном  $TR$ . Так, для ВЗ с системой слива при  $TR = 0.2$  увеличение частоты с 200 до 300 Гц повышает эффективность синтетических струй, в то время как при  $TR = 0.35$  повышение частоты синтетических струй снижает их эффективность. У ВЗ без системы слива при  $TR = 0.2$  увеличение  $f$  приводит к росту пульсаций скорости и статического давления, а при  $TR = 0.35$  – снижает уровень пульсаций статического давления.

При большем дросселировании ( $TR > 0.35$ ) расчеты для обоих вариантов ВЗ проводились только для  $q = 50$  и 100 м/с. Для  $TR = 0.45–0.55$  увеличение амплитуды струй при частоте 200 Гц слабо влияет на уровень пульсаций скорости для обоих вариантов ВЗ. При  $TR = 0.45$  оно приводит к увеличению  $\sigma$  и снижению пульсаций статического давления. Противоположная картина наблюдается при  $TR = 0.55$ : с ростом частоты синтетических струй увеличиваются потери полного давления и возрастает пульсация статического давления на выходе из ВЗ. При максимальном дросселировании ( $TR = 0.75$ ) рост частоты синтетических струй приводит к увеличению  $\sigma$  для ВЗ с

системой слива и к уменьшению этого параметра для ВЗ без системы слива. Уровень пульсаций статического давления у обоих ВЗ снижается с возрастанием  $TR$ . Увеличение частоты синтетических струй с 200 до 300 Гц при амплитуде  $q = 100$  м/с не оказывает влияния на уровень пульсаций скорости при  $TR = 0.45–0.55$  для обоих вариантов ВЗ. При  $TR = 0.45$  увеличение частоты струй слабо влияет на уровень  $\sigma$  и  $p'$ . Но при  $TR = 0.55$  у ВЗ с системой слива с ростом  $f$  наблюдается увеличение  $\sigma$  и  $p'$ . Для ВЗ без системы слива потери полного давления и уровень пульсаций статического давления с ростом частоты синтетических струй увеличиваются при указанной степени дросселирования. И наконец, при  $TR = 0.75$  у ВЗ с системой слива при увеличении частоты синтетических струй снижаются  $\sigma$  и пульсации скорости, и статического давления. Для ВЗ без системы слива увеличение частоты синтетических струй слабо влияет на их эффективность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью RANS/ILES-метода высокого разрешения проведены расчеты течения в ВЗ сверхзвукового самолета бизнес класса с имитатором планера. Целью расчетов было исследование влияния системы слива и режимных параметров синтетических струй на течение в ВЗ и характеристики течения и турбулентности на выходе из него. Были рассмотрены варианты ВЗ с системой слива и без него. Для обоих ВЗ расчеты проводились как без синтетических струй, так и со струями, у которых варьировалась амплитуда и частота. Анализ результатов расчетов показал следующее.

Для ВЗ без системы слива наблюдается небольшое снижение уровня  $\sigma$  в рабочем режиме. Однако при этом значительно уменьшаются пиковые значения турбулентных пульсаций скорости и давления в канале ВЗ в области взаимодействия замыкающего скачка уплотнения с пограничным слоем.

Применение синтетических струй позволило улучшить характеристики ВЗ с системой слива. При степени дросселирования  $TR = 0.2–0.35$  в выходном сечении ВЗ уровень пульсаций скорости удается снизить на 20 и 25%, а пульсаций статического давления – на 47 и 38% соответственно. Практически важным достоинством синтетических струй является то, что они позволили расширить диапазон устойчивой работы ВЗ с имитатором планера: при  $TR = 0.55$  удалось снизить пиковые значения пульсаций давления на выходе из ВЗ на 63%, а пульсаций скорости – на 40%. Синтетические струи увеличивали коэффициент расхода  $f$  при неизменном  $TR$  по сравнению с вариантом без синтетических струй.

У ВЗ без системы слива синтетические струи позволили увеличить уровень  $\sigma$  во всем исследованном диапазоне дросселирования ВЗ. Причем у

рабочем режиме он стал выше, чем у ВЗ с системой слива. Уровень пульсаций скорости и статического давления при использовании синтетических струй незначительно возрос, но при этом остался ниже того, который был у ВЗ с системой слива без синтетических струй.

Было установлено, что влияние режимных параметров синтетических струй на их эффективность зависит от наличия или отсутствия системы слива, степени дросселирования и параметра течения. Однако в целом хорошие результаты получены для варианта синтетических струй с амплитудой 50 м/с и частотой 200 Гц. При  $TR = 0.2$  у ВЗ с системой слива значение  $\sigma$  увеличилось на 0.7%, снизился уровень пульсаций скорости и статического давления на 14 и 47% соответственно. У ВЗ без системы слива уровень потерь полного давления уменьшился на 1%, пульсаций скорости — на 4%. При этом пульсации статического давления увеличились на 5%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun Y., Smith H. Review and Prospect of Supersonic Business Jet Design // Prog. Aeronaut. Sci. 2017. V. 90. P. 12.
2. Любимов Д.А., Потехина И.В. Исследование пространственного воздухозаборника на дроссельных и близких к помпажным характеристиках с помощью RANS/ILES-метода // Матер. XXVI науч.-техн. конф. по аэродинамике в п. Володарского. 2015. С. 156.
3. Любимов Д.А. Численное исследование нестационарных турбулентных течений в сверхзвуковых диффузорах // XI Всерос. съезд по фундам. проблемам теор. и прикл. механики. Казань, 2015. С. 2399.
4. Verma S.B., Hadjadj A. Supersonic Flow Control // Shock Waves. 2015. V. 25. P. 443.
5. Ball W.H. Tests of Wall Suction and Blowing in Highly Offset Diffusers // J. Aircraft. 1985. V. 22. № 3. P. 161.
6. Coiro D.P., Bellobouno E.F., Nicolosi F., Donelli R. Improving Aircraft Endurance Through Turbulent Separation Control by Pulsed Blowing // J. Aircraft. 2008. V. 45. № 3. P. 990.
7. Murugan T., Deyashi M., Dey S., Rana S.C., Chatterjee P.K. Recent Developments on Synthetic Jets // Defence Sci. J. 2016. V. 66. № 5. P. 489.
8. Любимов Д.А. Исследование влияния струй с нулевым массовым расходом на течение в криволинейном диффузоре // ТВТ. 2011. Т. 49. № 4. С. 557.
9. Lyubimov D., Makarov A., Potekhina I. Experimental and Numerical Research of Unsteady Flow in Curvilinear Channel with Active Flow Management Using “Synthetic” Jets // 28th Int. Congress of the Aeronautical Science. Brisbane, 2012. Pap № 932.
10. Любимов Д.А., Потехина И.В. Применение RANS/ILES-метода для анализа эффективности управления отрывными течениями в диффузорах с помощью синтетических струй // МЖГ. 2015. № 4. С. 144.
11. Guang Y., Yufeng Y., Jian F., Tian G., Qiushi L., Lipeng L. Large-eddy Simulation of Shock-wave/Turbulent Boundary Layer Interaction with and without SparkJet Control // Chin. J. Aeronaut. 2016. V. 29. № 3. P. 617.
12. Narayanaswamy V., Laxminarayan L., Raja L.L., Noel T., Clemens N.T. Control of a Shock/Boundary-Layer Interaction by Using a Pulsed-Plasma Jet Actuator // AIAA J. 2012. V. 50. № 1. P. 246.
13. Trapier S., Deck S., Duveau P. Delayed Detached-Eddy Simulation and Analysis of Supersonic Inlet Buzz // AIAA J. 2008. V. 46. № 1. P. 118.
14. Spalart P.L., Deck S., Shur M.L., Squires K.D., Strelets M., Travin A. A New Version of DES, Resistant to Ambiguous Grid Densities // Theor. Comput. Fluid Dyn. 2006. V. 20. P. 181.
15. Любимов Д.А., Потехина И.В. Исследование нестационарных режимов работы сверхзвукового воздухозаборника RANS/ILES-методом // ТВТ. 2016. Т. 54. № 5. С. 784.
16. Любимов Д.А. Разработка и применение метода высокого разрешения для расчета струйных течений методом моделирования крупных вихрей // ТВТ. 2012. Т. 50. № 3. С. 450.
17. Suresh A., Huynh H.T. Accurate Monotonicity-Preserving Schemes with Runge-Kutta Time Stepping // J. Comput. Phys. 1997. V. 136. № 1. P. 83.
18. Виноградов В.А., Макаров А.Ю., Мелконян Н.А., Степанов В.А. Экспериментальное исследование нерегулируемого пространственного воздухозаборника сверхзвукового делового самолета // Уч. зап. ЦАГИ. 2017. Т. XLIII. № 3.