

УДК 621.431.75

Экспериментальные данные о потоке в газовом эжекторе для верификации моделей турбулентности

Ларина Е.В.*, Ципенко А.В.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: larinaelenav@gmail.com*

***e-mail: tsipenko_av@mail.ru*

Аннотация

В статье представлены экспериментальные данные о потоке в газовом эжекторе и результаты численных экспериментов. Дан полный набор экспериментальных данных (в статье и указанных ссылках), пригодных для верификации вычислительных моделей, в том числе на нестационарных режимах. Приведены результаты численного эксперимента с использованием программы, разработанной Крюковым И.А. и Ивановым И.Э., и реализующей метод С.К.Годунова, и пакета программ FlowVision. В расчетах получены режимы с колебанием давления в вакуумной камере и перемещением точки отрыва псевдоскачка. Отмечена проблема адекватного воспроизведения в численном эксперименте частотных характеристик колебаний.

Ключевые слова: газовый эжектор, вакуумный насос, экспериментальные данные, газовая струя, псевдоскачок, отрыв пограничного слоя, численное моделирование, метод Годунова

Введение

Современное многообразие моделей турбулентности требует разнообразных данных для их сравнения. Стандартный способ – численный эксперимент по моделированию хорошо исследованных в эксперименте газовых потоков (канонических течений, то есть течений с простой геометрией, являющихся примерами типичных видов течения газа), по которым имеется доступный и подробный набор данных, включая описание геометрии, начальных и граничных условий. Для газовых потоков стандартными являются задачи моделирования потока вдоль пластины, натекание на сжимающий угол, автомобильная осесимметричная струя, перерасширенная струя с набором «бочек», отрыв пограничного слоя. С этой точки зрения газовый эжектор, работающий как вакуумный насос, является очень удобным устройством. Это отмечалось в ряде работ, например [1], в которой проведено сравнение k - ε моделей турбулентности с учетом и без учета сжимаемости и SST-модели на основе экспериментальных данных о течении в осесимметричном эжекторе. Однако в этой работе не рассматривались периодические, отрывные режимы.

Преимущества потока в эжекторе для численного эксперимента:

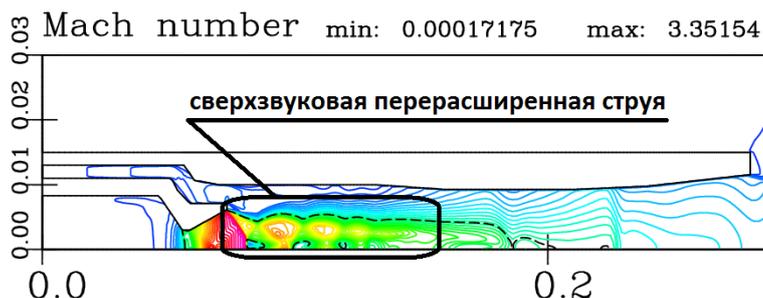
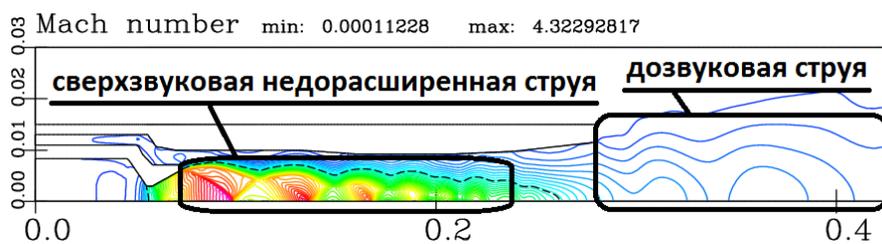
- осевая симметричность конструкции и подачи газа позволяет сравнивать с экспериментом 1D-, 2D- и 3D-модели (математические модели в одно-, дву- и трехмерной системах координат);

- жесткие стенки с известными параметрами (форма, температура, материал), что снимает проблему определения параметров на границе расчетной области;

- простое задание начальных параметров поля газа и газа на входе, достаточно равномерно распределенных параметров торможения;

- различные виды течений (сверхзвуковая недорасширенная и перерасширенная струя, дозвуковая струя, отражение скачка от стенки, сверхзвуковой и дозвуковой пограничный слой, положительный и отрицательный градиент давления вдоль стенки, стационарный и нестационарный отрыв) в одном устройстве в разных сочетаниях, которые могут быть различными в зависимости от режима работы (рис.1);

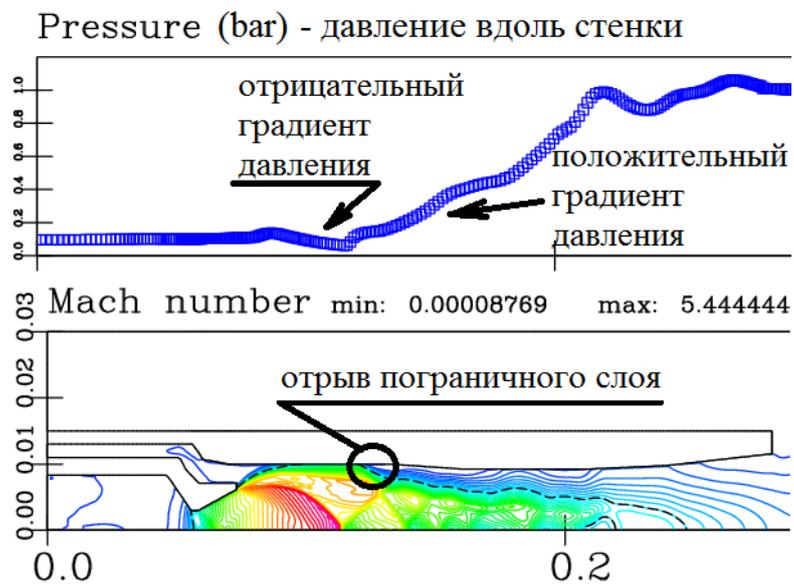
- удобный набор экспериментальных данных (давление вдоль стенки, известные параметры торможения и расходы) для сравнения с результатами моделирования по локальным и интегральным параметрам.



б)



в)



г)

Рис.1. Виды течений в эжекторе.

Газовый эжектор – широко распространенное техническое устройство, принципы работы и варианты конструкций которого описаны в учебной литературе. Представление о современном состоянии дел в области экспериментального и численного изучения и использования сверхзвуковых газовых эжекторов различных конструкций можно получить по работам [1-11, 13, 15, 16, 21-24] и указанным в этих работах ссылках. В экспериментах используется современная визуализация

течения [2], получены данные о давлении вдоль стенки канала эжектора [3], пригодные для трехмерного численного моделирования. Но подавляющее большинство авторов ограничиваются только данными на входе и выходе эжектора, такими как давления эжектирующего и эжектируемого потоков, температуры и коэффициент эжекции [2, 4-7]. Это связано с практической стороной использования эжекторов как насосов и поиске оптимальных соотношений параметров для конкретных схем, газов и диапазонов давлений и температур.

В редких работах обращается внимание на нестационарные и периодические процессы [8, 9], на проблему вывода эжектора на оптимальный режим работы. Например, в работе [10] в экспериментальных данных есть разброс, позволяющий говорить о «гистерезисе», но авторы на этой проблеме не заострили внимание.

В численном эксперименте в основном используются широко известные коды типа ANSYS [5, 11], или одномерные модели [12-24], настроенные на конкретные типы эжекторов, газы, давления и температуры.

Целью данной работы является представление ранее полученных и частично описанных экспериментальных данных [25, 26], а также анализ соответствующих результатов численного эксперимента с использованием k - ϵ модели турбулентности и численного метода Годунова [27, 28]. Использовался проверенный на различных типах течений код [29-31].

Экспериментальные данные для численного эксперимента

В работе рассматривается одноступенчатый осесимметричный эжектор классической односопловой схемы (рис. 2). Принципы работы эжекторов такого типа описаны в учебниках и монографиях [например, 17-21, 32]. Особенности течения в данном эжекторе излагались в работе [26]. Прежде всего отметим так называемый «гистерезис» в зависимости давления в вакуумной камере от давления на входе в сопло (рис. 4), который даже на одном и том же устройстве наблюдается не всегда (сравни рис. 4-а и 4-г). В реальной эксплуатации вывод эжектора на оптимальные (экстремальные) показатели давления и/или расходов является непростой задачей и требует строго соблюдения экспериментально отработанной технологии запуска. Другой особенностью является наличие низкочастотных пульсаций давления, связанных с периодическим перемещением точки отрыва псевдоскачка (рис. 5).

В качестве рабочего тела использовался сжатый азот из баллонной системы с температурой торможения 300 К. Расчетным путем в работе [26] получены значение минимального давления запуска (получение устойчивого разрежения в камере) для эжектирующего газа 8.14 bar; среднее давление около среза эжектирующего сопла 0.063 bar при температуре 70.5 К, то есть конденсация азота минимальна. Одномерная теория [17] дает значение минимального давления запуска 8.18 bar и давление в вакуумной камере (на срезе сопла) 0.051 bar. Эти параметры соответствуют расположению псевдоскачка в зоне перехода от горла к диффузору эжектора. По изложенной в [26] технологии получены размеры проточной части (рис. 2).

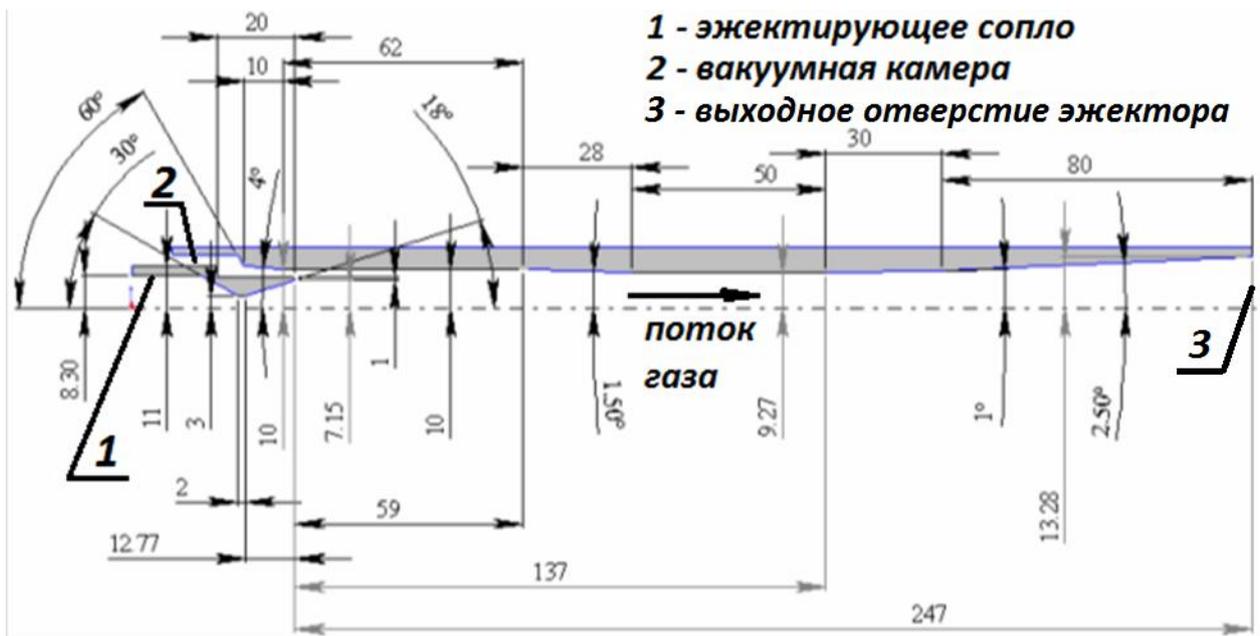


Рис. 2. Эскиз экспериментального осесимметричного эжектора.

Схема размещения датчиков давления приведена на рис.3. Система сбора данных обеспечивала время между показаниями датчиков 0.001 с. Погрешность показаний датчиков давления составляла менее 35 Па (0,005 psi). Результаты различных запусков не осреднялись. Расстояния даны от выходного отверстия эжектора в мм. Номера датчиков (*P1*, *P2* и т.д.) соответствуют названиям колонок в прилагаемых файлах EXCEL. Датчики с номерами *P14*, *P16*, *P18* располагались в сечении эжектора, близком к расположению датчика *P15* и их показания иллюстрируют степень отличия потока от осесимметричного. Датчик *P19* располагался на торце эжектора недалеко от выходного отверстия. Основные экспериментальные данные находятся в файлах по ссылке [25], соответствующие графики для одного из экспериментов приведены на рис.5. В работе [26] была допущена ошибка в указании единиц давления – должны быть psi (1 psi = 0.06804596390998 физическая атмосфера).

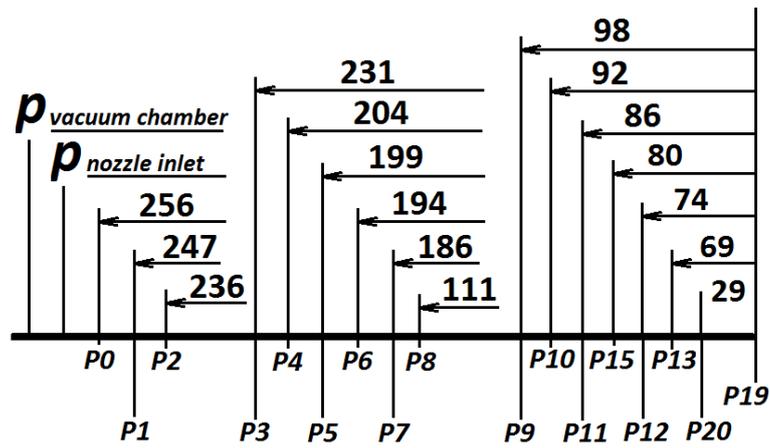


Рис.3. Схема размещения датчиков давления. Расстояния даны от выходного отверстия эжектора в мм.

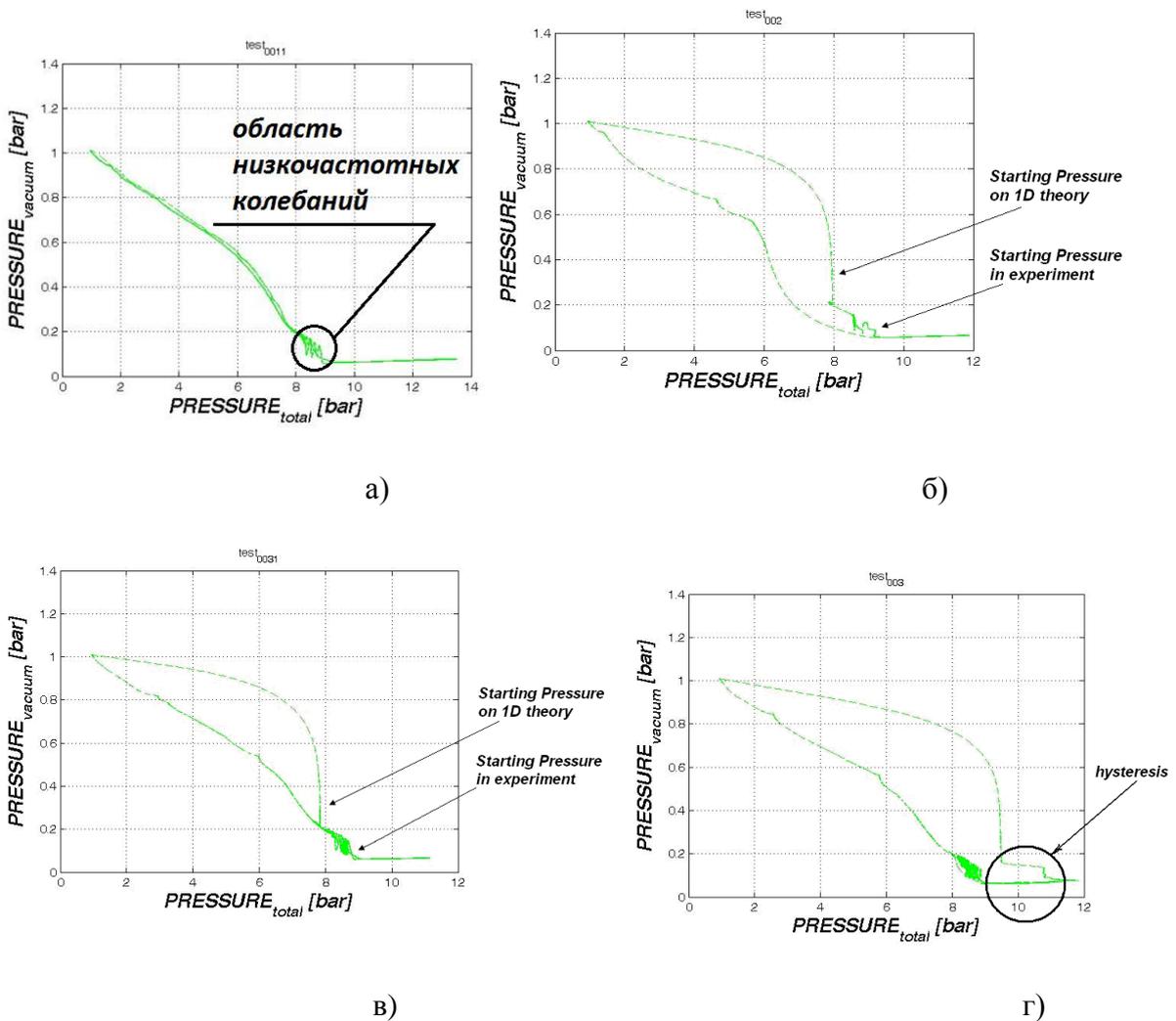


Рис. 4. Зависимость давления в вакуумной камере от полного давления на входе в эжектирующее сопло для четырех различных экспериментальных запусков эжектора.

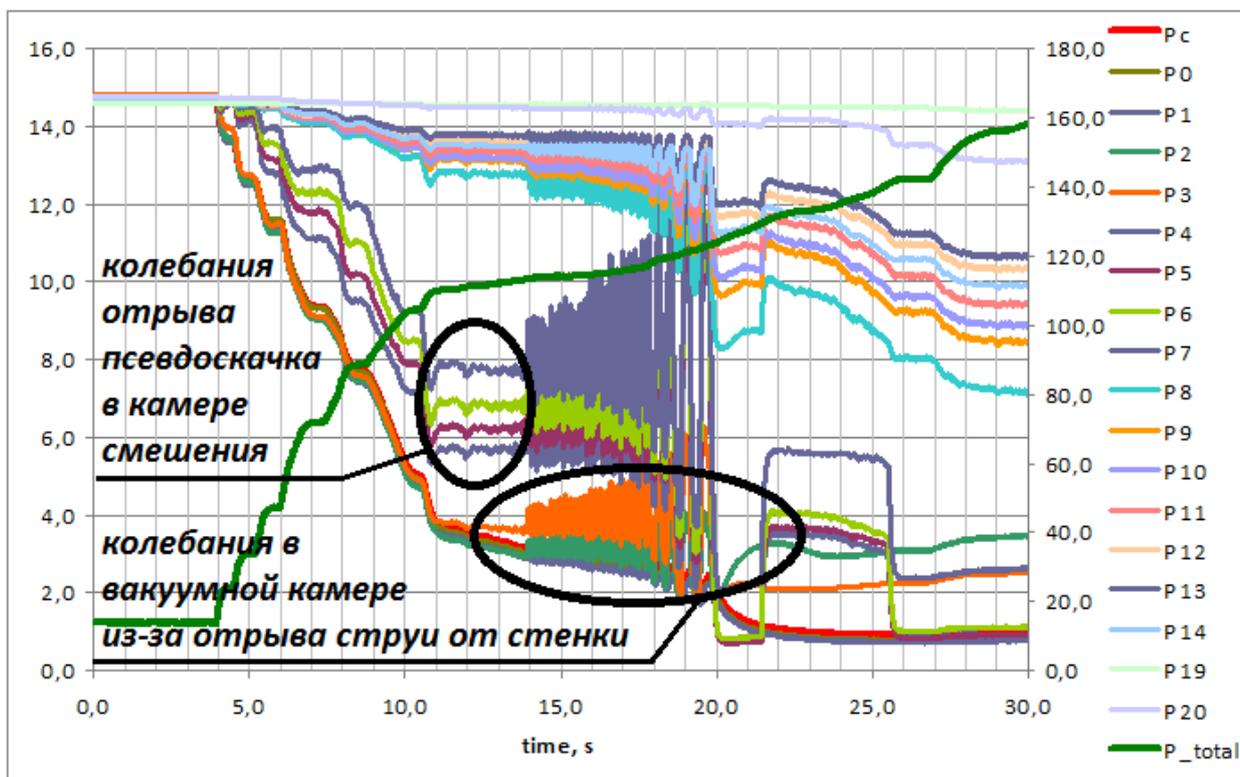


Рис. 5. Изменение показаний датчиков давления в течение эксперимента (соответствует рис. 4-а). Вертикальные шкалы в psi (1 psi = 0.06804596390998 физическая атмосфера). Монотонно возрастающий (зеленый) график – изменение полного давления эжектирующего газа. Pс – давление в вакуумной камере.

Основные результаты эксперимента и численное моделирование

В экспериментах получено минимальное давление запуска 9.055 bar (максимальное 9.5 bar) и соответствующее давление в вакуумной камере 0.057 bar (рис. 4-в). Сравнение одномерной теории с данными эксперимента показывает, что одномерная теория дает нижнюю (оптимистичную) оценку давления запуска. Верхняя кривая на рис. 4-б,-в,-г соответствует повышению давления на входе в эжектирующее сопло (запуск эжектора), нижняя – понижение давления (остановка

эжектора). Видно, что численный эксперимент соответствует нижней кривой (рис. 7). Возможно, это связано с очень маленьким объемом вакуумной камеры в численном эксперименте по сравнению с реальной установкой, где требуется откачать большее количество газа.

Периоды низкочастотных колебаний давления в канале, при которых значительно меняется амплитуда, составляют ряд: 0.41; 0.54; 0.61; 1.23; 1.47; 1.56; 1.66 с. Эксперименты также показали, что минимальному устойчивому давлению в вакуумной камере соответствует минимальный уровень высокочастотного шума эжектора.

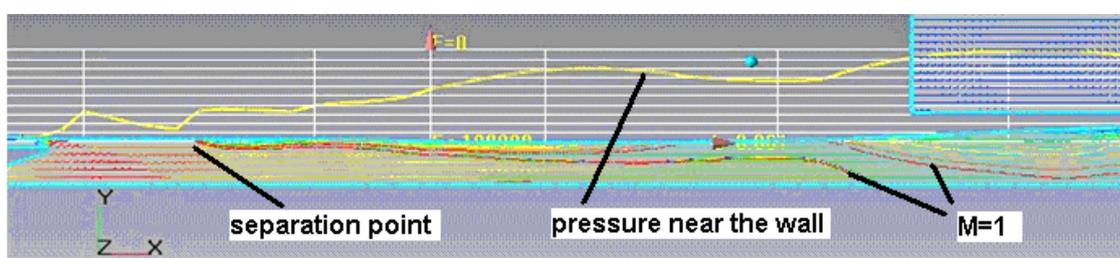
Колебания близкой амплитуды получены в численном эксперименте с использованием пакета программ FlowVision [26, 33] k - ϵ модели турбулентности [34] (рис. 6), однако период этих колебаний 0.01 с и соответствуют они давлению на входе в эжектирующее сопло 11 bar. Использование модели Спалларта-Алмараса [35] дало стационарное положение точки отрыва, картина течения полностью соответствует рис. 6-б.

С использованием оригинального кода авторов на базе кода [27, 28] и метода Годунова проведено численное моделирование работы эжектора для нескольких вариантов давления эжектирующего газа (рис. 7). В расчетах получены режимы с колебанием давления в вакуумной камере и перемещением точки отрыва псевдоскачка, аналогично результатам [26] (рис. 7).

Проведена модификация кода расчета пространственного течения, а именно реализована неявная схема из статьи [36], основанная на методе LU-SGS с пространственной аппроксимацией 2-го порядка точности для решения трехмерных

уравнений Навье-Стокса. В расчете, проведенном по реализованной схеме, получено адекватное соответствие по давлению в вакуумной камере для стационарного случая при давлении 11 атм. во входном сечении сопла (рис. 7).

Таким образом, численный эксперимент дает приемлемые средние параметры потока, но абсолютно неприемлемые частотные характеристики. По-видимому, это связано с особенностями используемых моделей турбулентности.



а)



б)

Рис. 6. Поле скорости, график давления вдоль стенки и изолинии $M=1$ по результатам численного эксперимента (FlowVision). Показан график избыточного давления, диапазон шкалы от 0 до -100000 Па. Крайние положения точки отрыва (расчет по $k-\varepsilon$ модели турбулентности) показаны на рисунках а) и б).

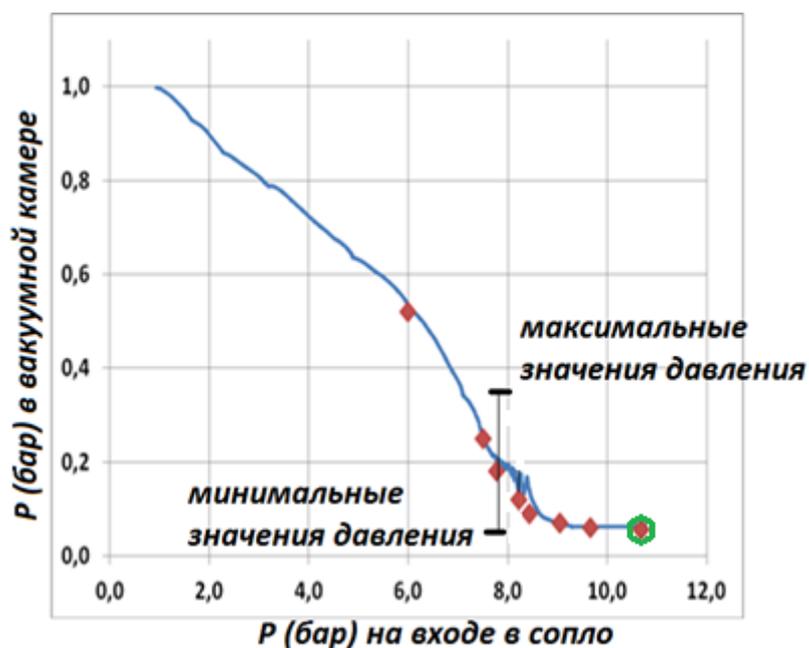


Рис.7. Результаты численного эксперимента (красные ромбы – расчет по методу Годунова; зеленый шестиугольник – расчет с использованием FlowVision) в сравнении с экспериментом (рис. 4-а). Для режима с пульсирующей точкой отрыва показан диапазон пульсаций давления в численном эксперименте.

Выводы

Представленные в работе и ссылках [25, 26] экспериментальные данные достаточно полные и пригодны для верификации моделей турбулентности, в частности, на основании анализа положения точки отрыва псевдоскачка при нестационарном режиме работы эжектора (наличие низкочастотных пульсаций давления в вакуумной камере). Численный эксперимент с использованием $k-\varepsilon$ модели турбулентности показал лучшие результаты на двух принципиально различных численных методах и сетках по сравнению с моделью Спалларта-Алмараса.

Уровень шума может служить критерием для определения оптимального режима работы эжектора (минимальный шум соответствует минимальному устойчивому давлению в вакуумной камере).

Результаты расчетов, приведенные на рис.1, получены с помощью программы, разработанной Крюковым И.А. и Ивановым И.Э. [27,28]

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 16-38-60185, № 16-01-00444а.

Библиографический список

1. Balasubramanyam M. S., Chen C.P. Investigation of Compressibility Effect for Aeropropulsive Shear Flows // 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 10 - 13, Tucson, Arizona, AIAA 2005-3712.
2. Srisha M.V.Rao, Jagadeesh G. Novel supersonic nozzles for mixing enhancement in supersonic ejectors // Applied Thermal Engineering, 2014, no. 71, pp. 62-71.
3. Kathleen M. Tacina, Rene Fernandez, John W. Slater, Stefanie M. Moody. An Analysis of Pitot and Static Pressure Measurements in an Unsteady Supersonic Flow // 34th AIAA Fluid Dynamics Conference, June 28 – July 1 Portland, Oregon, AIAA Paper 2004 – 2719.
4. Yarıcı R., Ersoy H.K., Aktoprakoglu A., Halkacı H.S., Yigitb O. Experimental determination of the optimum performance of ejector refrigeration system depending on ejector area ratio // International Journal of Refrigeration, 2008, no. 31, pp. 1183 – 1189.

5. Tony Utomo, Myongkuk Ji, Pilhwan Kim, Hyomin Jeong, Hanshik Chung. CFD Analysis on the Influence of Converging Duct Angle on the Steam Ejector Performance // EngOpt 2008. International Conference on Engineering Optimization Rio de Janeiro, Brazil, 01 - 05 June 2008. Printed and CD ROM Proceedings: ISBN 978-85-7650-152-7. http://engopt.org/08/nukleo/pdfs/0559_cfd_analysis_engopt.pdf
6. Huang B.J., Chang J.M., Wang C.P., Petrenko V.A. A 1-D analysis of ejector performance // International Journal of Refrigeration, 22 (1999), pp. 354 – 364.
7. Huang B.J., Chang J.M. Empirical correlation for ejector design // International Journal of Refrigeration, 22 (1999), pp. 379 – 388.
8. Woo Woo Jong Hong' and Charles A. Garris, Jr. Non-Steady Flow Ejector Technology Applied To Refrigeration With Environmental Benefits // 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-2000-0726. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2000-726>
9. Kathleen M. Tacina, Rene Fernandez, John W. Slater, Stefanie M. Moody. An Analysis of Pitot and Static Pressure Measurements in an Unsteady Supersonic Flow // 34th AIAA Fluid Dynamics Conference, June 28 – July 1 Portland, Oregon. AIAA Paper 2004-2719.
10. Imran H. Implementation of a Supersonic Ejector for Capturing Dry-Gas Seal Vent Gases // Presented at the 17th Symposium on Industrial Application of Gas Turbines (IAGT), Banff, Alberta, Canada – October 2007, Paper No: 07-IAGT, 1.5.
11. Rusly E., Aye Lu, Charters W.W.S., Ooi A. CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system // International Journal of Refrigeration. 2005, no. 28, pp. 1092 – 1101.

12. Васильев Ю.Н. Теория сверхзвукового газового эжектора с цилиндрической камерой смешения // Лопаточные машины и струйные аппараты. 1967. № 2. С. 171 - 235.
13. Сыченков В.А., Панченко В.И., Халиулин Р.Р. Исследование коаксиального газового эжектора // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2014. № 2. С. 24 - 28.
14. Милионщиков М.Д., Рябинков Г.М. Газовые эжекторы больших скоростей. Сборник работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов. - М.: ЦАГИ, 1961. С. 5 - 32.
15. Цегельский В.Г. К теории газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 2. С. 46 - 71.
16. Панченко В.И., Бикбулатов Р.Р. Расчет идеального увеличителя тяги // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2012. № 1. С. 36-39.
17. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. - М.: Наука, 1991. Ч. 1. - 597 с.
18. Аркадов Ю.К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. - М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2001. - 336 с.
19. Цейтлин А.Б. Пароструйные вакуумные насосы. – Москва-Ленинград, Энергия, 1965. – 399 с.
20. Герман Р. Сверхзвуковые входные диффузоры. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1960. - 290 с.
21. Цегельский В.Г. Струйные аппараты. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2017. – 573 с.

22. Шушин Н.А. О расчете газового эжектора // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1999. № 3. С. 47 - 50.
23. Шушин Н. А. Газовый эжектор с тангенциальным вдувом в камеру смешения. // Ученые записки ЦАГИ, 2010, Т. XLI, № 3, С. 69 - 81.
24. Письменный В.Л. Математическая модель звукового газового эжектора с цилиндрической камерой смешения в системе турбоэжекторного двигателя // Труды МАИ. 2003. № 12. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34456>
25. Экспериментальные данные: https://mai.ru/education/fpmf/801_sci_papers/ (смотри Data XLS files)
26. Kartovitskiy L., Lee J.H., Tsipenko A. Numerical and Experimental Investigation of Non-Stationary Processes in Supersonic Gas Ejector // 29th ICAS Congress (29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), ICAS 2014. ISBN CD: 3-932182-80-4.
27. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Метод расчета турбулентных сверхзвуковых течений // Математическое моделирование. 2009. Т. 21. № 12. С. 103 - 121.
28. Иванов И.Э., Крюков И.А. Квазимонотонный метод повышенного порядка точности для расчета внутренних и струйных течений невязкого газа. // Математическое моделирование. 1996. Т. 8. № 6. С. 47 - 55.
29. Иванов И.Э., Крюков И.А. Численное исследование турбулентных течений с ограниченным и свободным отрывом в профилированных соплах // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 7, С. 23 - 30.

30. Иванов И.Э., Крюков И.А. Численное моделирование течения газа в псевдоскачке // Материалы IX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. NPNJ-2012, Алушта, 23-25 мая 2012, Изд-во МАИ, С. 39 - 42.
31. Иванов И.Э. Численное исследование отрывных турбулентных течений в сверхзвуковых соплах // Механика жидкости и газа. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (3). С. 801 – 803.
32. Addy A., Dutton J., Mikkelensen C. Supersonic EjectorDiffuser Theory and Experiment, University of Illinois, Urbana, 1981, URL: https://www.researchgate.net/publication/235114679_Supersonic_Ejector-Diffuser_Theory_and_Experiments
33. Система моделирования движения жидкости и газа. Flow Vision. URL: http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_cert_techcond.pdf
34. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD, DCW Industries, Inc., 1994, 460 p,
35. Bardina J.E., Huang P.G. and Coakley T.J. Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development, NASA TM-110446, 1997, 100 p.
36. Борисов В.Е., Давыдов А.А., Кудряшов И.Ю., Луцкий А.Е., Меньшов И.С. Параллельная реализация неявной схемы на основе метода LU-SGS для моделирования трехмерных турбулентных течений // Математическое моделирование. 2014. Т. 26. № 10. С. 64 – 78.