

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ФОРСУНОК, РАБОТАЮЩИХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

© 2007 А. Ю. Васильев

Центральный институт авиационного моторостроения, Москва

В работе приведена обобщенная классификация форсуночных устройств. Разработана классификация устройств с использованием энергии воздушного потока для распыла топлива. Дано общее описание принципов работы форсунок относящихся к каждой отдельной группе. Проведен сравнительный анализ устройств по мелкости распыливания от отношения расходов воздуха и топлива, перепада давления воздуха и безразмерного коэффициента K .

К настоящему времени в газотурбинных двигателях используется или предполагается использовать огромное количество разнообразных форсуночных устройств, отличающихся не только конструкцией, но и принципами, на которых основана система распыла топлива. Для упрощения выбора типа требуемого форсуночного устройства в каждом конкретном случае необходимо разработать их классификацию. Основным пунктом требований, предъявляемых к форсуночным устройствам, является хорошее распыливание

топлива, следовательно, наиболее логичным будет классифицировать устройства по типу превращения подаваемого объема топлива в ансамбль капель топливовоздушного факела, т. е. по типу распыливания. Тип распыливания наиболее просто разделить по основной энергии, затрачиваемой на распыл жидкости, т. е. использовать для классификации так называемый энергетический подход [1-3]. Схема общей классификации форсунок и их разделение по 3 основным и 3 промежуточным (комбинированным) группам приведена на рис. 1.



Рис. 1. Общая классификация распыливающих устройств

Гидравлическое распыливание – процесс, при котором на распад формы жидкости расходуется энергия самой жидкой формы (собственные колебания струи, потеря устойчивости пленкой).

Механическое распыливание - процесс, при котором распад формы жидкости происходит под действием внешних, не аэродинамических, сил (акустические резонаторы, электрические поля, механическое воздействие движущихся частей форсунки).

Пневматическое распыливание – процесс, при котором на распад формы жидкости расходуется энергия подводимого в форсунку воздуха от основного компрессора двигателя (распыливание форм жидкости потоками воздуха).

Комбинированное механическо-гидравлическое распыливание – процесс, при котором в распаде формы жидкости принимает участие не только энергия самой жидкой формы, но и пассивного внешнего источника (распыл с поверхности).

Комбинированное механическо-пневматическое распыливание – процесс, при ко-

тором в распаде формы жидкости принимает участие не только энергия подводимого в форсунку воздуха от основного компрессора, но и внешнего источника, включая воздух большего давления, чем располагаемый в двигателе (ударно-пневматическая форсунка, форсунки с эмульсированием, форсунки с подводом воздуха от внешнего источника).

Комбинированное гидравлическо-пневматическое распыливание – процесс, при котором в распаде формы жидкости принимает участие как энергия самой жидкой формы, так и энергия подводимого в форсунку воздуха от основного компрессора (комбинированные центробежно-пневматические форсунки).

Классификация форсунок справедлива лишь для одинаковых «идеальных» условий, например, работа форсунки в незамкнутом пространстве в неподвижной газовой среде. Иначе, например при работе в камере сгорания центробежной форсунки, пленка топлива может не успевать распасться самостоятельно, а будет разрушена высокоскоростным потоком воздуха. То есть центробежная фор-

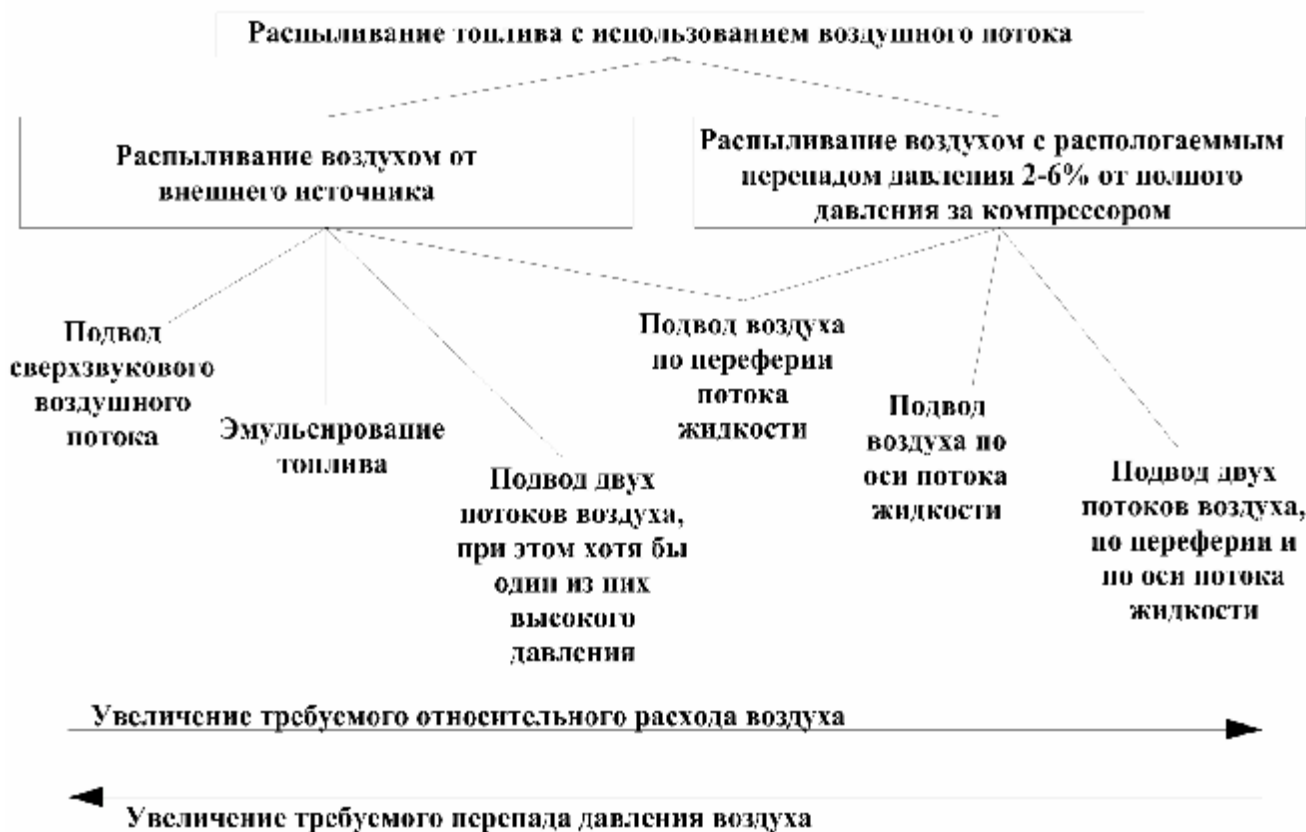


Рис. 2. Классификация форсуночных устройств с использованием энергии воздушного потока для распыла топлива

сунка переместилась бы по классификации из группы гидравлического распыла топлива до группы пневматического распыла.

На рисунке 2 приведена классификация форсуночных устройств с использованием энергии воздушного потока для распыла топлива, т.к. появившееся в последние годы огромное количество конструкций форсунок с пневматическим распылом также требует классификации хотя бы для более полного понимания принципов их работы. Классификация распыливающих устройств разработана по месту подвода воздушного потока. Такие системы распыливания топлива делятся на устройства с использованием вспомогательного воздуха, подаваемого от внешнего источника (баллон или дополнительный компрессор), и устройства, работающие с имеющимся перепадом давления воздуха, нагнетающимся основным компрессором газотурбинного двигателя.

Ряд устройств с использованием вспомогательного воздуха начинается с форсунок с подачей сверхзвукового воздушного потока или так называемых акустических распылителей. Для получения требуемых характеристик по мелкости распыливания им достаточно небольшого относительного (к топливу) расхода воздуха с большим перепадом давления. Струя или пленка жидкости подвергается воздействию ультразвуковых колебаний воздуха, создаваемых генератором, и распадается на капли. Ультразвуковые распылители используются в основном в медицине, в технологических агрегатах.

Следующей группой в ряду устройств с использованием вспомогательного воздуха стоят так называемые в литературе форсунки с эмульгированием или барботированием топлива. В этом типе форсунок потоки воздуха и топлива смешиваются непосредственно в каналах форсунки до прохождения смеси сопла. Как показано в работе [4], в зависимости от отношения расходов поток топлива может приобретать структуру аэрозоля, вытесняться на стенку или, заполняя весь объем, содержать в себе воздушные пузыри. На выходе из форсунки вследствие резкого падения давления объем газовой фазы также резко увеличивается, разрывая окружающую

его жидкую фазу на мелкие капли. К недостаткам можно отнести повышенную склонность к возникновению пульсаций концентраций и необходимость высокого давления подачи эмульгирующего воздуха. К достоинствам можно отнести возможность получения сверхмелких диаметров капель. В работе [5] описана шестиструйная форсунка для МГТД с подводом воздуха высокого давления в топливный коллектор и обдувочным воздухом под экран (рис. 3а). На рис. 3б показана пневматическая форсунка с эмульсированием в каналах топливного шнека вблизи сопла и внешним закрученным потоком воздуха [6].

Следующей группой в ряду устройств с использованием вспомогательного воздуха стоят форсунки с подводом двух потоков, периферийного и осевого; при этом хотя бы один из потоков - высокого давления. Форсунки с подводом воздуха от внешнего источника могут быть различных схем, сходных со схемами пневматических форсунок. Низконапорная, по топливу, форсунка описана в работе [7]. На рис. 3в представлена ее схема.

Группа форсунок с подводом воздуха по периферии потока топлива является переходной между рядом устройств с использованием вспомогательного воздуха и рядом форсунок пневматической схемы. Это означает, что для экстремальных условий работы при низких температурах или для распыливания вязких топлив может быть создана форсунка этого типа, работающая либо при постоянной подаче вспомогательного воздуха, либо при кратковременном ее включении с последующей работой от располагаемого перепада давления воздуха. А для обычных условий эксплуатации может быть создана форсунка, работающая постоянно от располагаемого перепада давления воздуха. И эти форсунки могут иметь одинаковую конструкцию. На рис. 4ж представлена схема такой форсунки.

Форсунки с подводом воздуха по оси потока топлива могут распыливать лишь объемную форму жидкости - кольцевую пленку, сформированную закручивающим аппаратом. Вообще такие форсунки в основном используются совместно с внешним завихри-

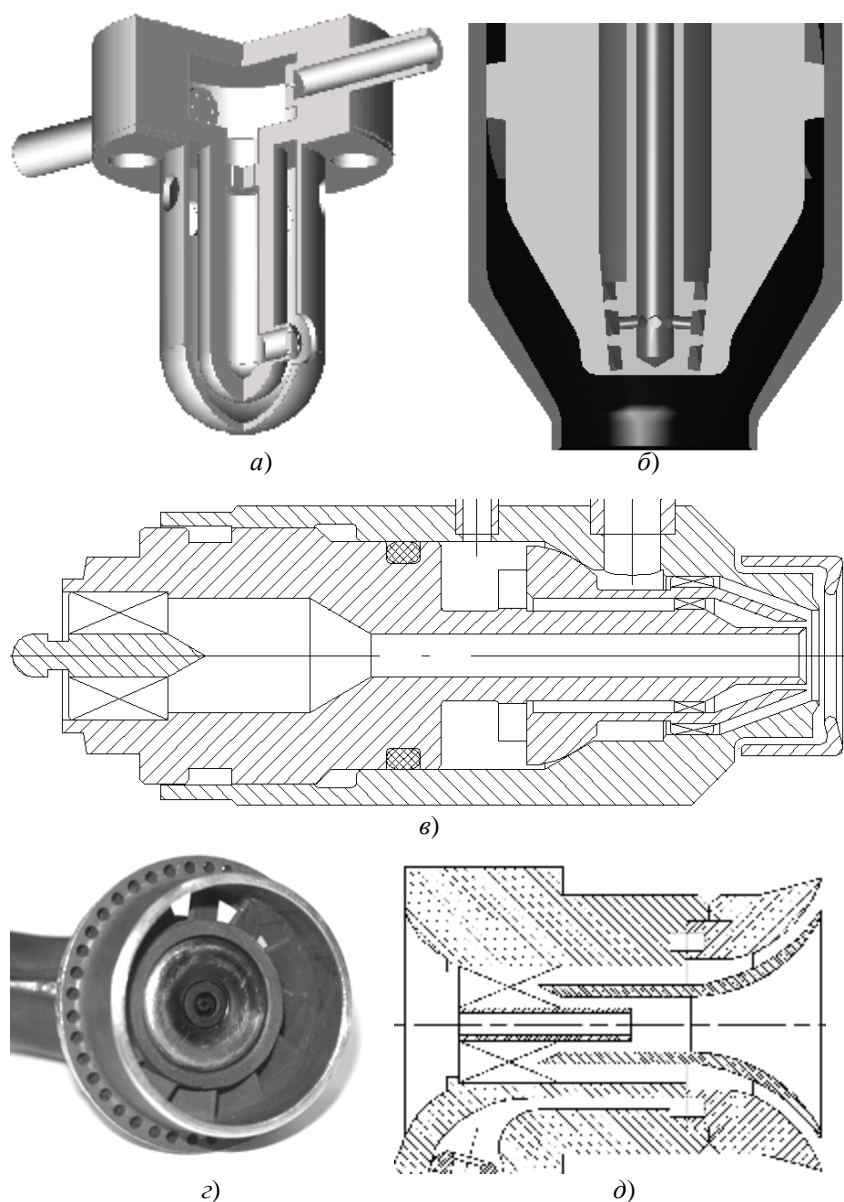


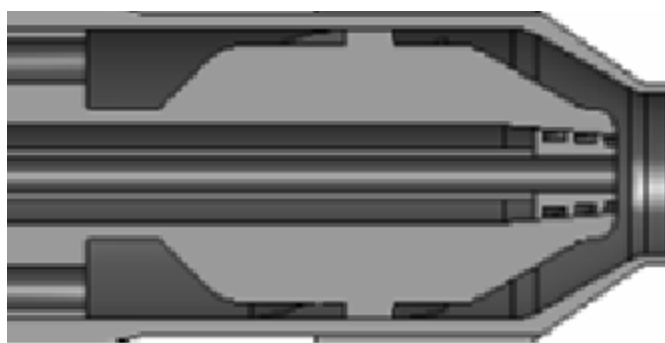
Рис. 3. Схемы исследованных форсуночных устройств

телем, потому что без внешнего ограничивающего потока высокоскоростной центральный поток отражал бы часть капель топлива на периферию, в районе кромки сопла. В работе [8] приводятся данные по модификации форсунки типа ПС-90 и ее внешнего завихрителя (рис. 3г) с целью уменьшения давления подачи топлива и улучшения дисперсных характеристик факела. Форсунка такого же типа показана на рис. 3д, проведены ее испытания как с внешним завихрителем, так и автономно.

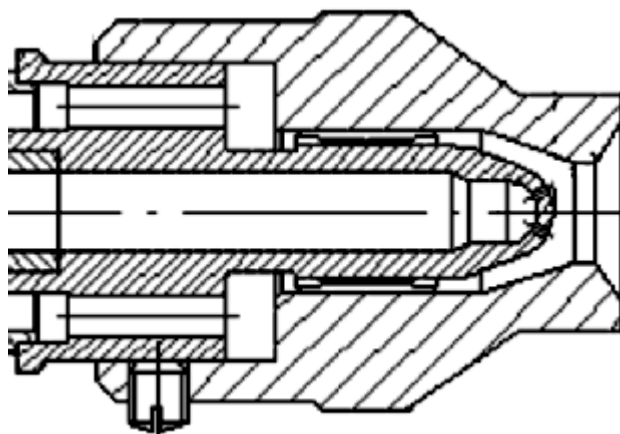
Форсунки с подводом двух потоков воздуха по периферии и по оси потока жидкости наиболее применимы в камерах сгорания

газотурбинных двигателей. Описанная в работе [9] форсунка с закруткой периферийного потока воздуха и протоком по оси факела, показанная на рис. 4е, относится к такому типу устройств. Принципы работы данной форсунки отличаются от других устройств тем, что центральный поток воздуха (на режимах запуска и малого газа) служит лишь для поддержания заданного направления топливной пленки и практически не участвует в распыливании.

При выборе типа пневматического распыливающего устройства зачастую возникают ограничения, связанные либо с недостатком массового расхода воздуха, выделенного



е)



ж)

Рис. 4. Схемы форсуночных устройств, разработанных в ЦИАМ

на распыл топлива, либо с низким перепадом давления воздуха на фронтном устройстве (особенно на режиме запуска). Приведенные на рис. 5-7 графики помогут в выборе типа устройства для конкретных параметров разрабатываемого или модернизируемого двигателя. Буквенная маркировка кривых на рис. 5-7 соответствует позициям на рисунках 3-4. Эксперименты выполнены при атмосферном давлении на керосине марки ТС-1.

На рис. 5 приведено сравнение экспериментально полученной мелкости капель различных распыливающих устройств с использованием воздушного потока в зависимости от величины отношения расходов воздуха к топливу (AAFR). На рис. 6 приведено аналогичное сравнение в зависимости от максимальной (для двух потоков) величины перепада давления. Видно, что кривая «б», соответствующая эмульсионно-пневматической

форсунке, позволяет получить мелкие капли (12 мкм) при минимальном соотношении расходов воздуха и топлива (0,375), но для этого необходимо использовать большой перепад по воздуху (430 кПа). Эмульсионная форсунка, разработанная ранее, - кривая «а» - позволяет получить сверхмелкие размеры капель (10 мкм), но при большем отношении расходов (0,9) и достаточно большом перепаде (270 кПа). Основная пневматическая форсунка - кривая «ж» - также работает при минимальных отношениях AAFR, но не позволяет достичь требуемой мелкости капель в 20 мкм даже при больших перепадах давления по воздуху (50 кПа). Пневматическая форсунка с центральным протоком воздуха - кривая «е» - позволяет получить хорошую мелкость капель (20 мкм) при 25 кПа перепада и 13 мкм при 35 кПа, при AAFR 0,45-0,55. Форсунка с подводом воздуха от внешнего источника в один из каналов - кри-

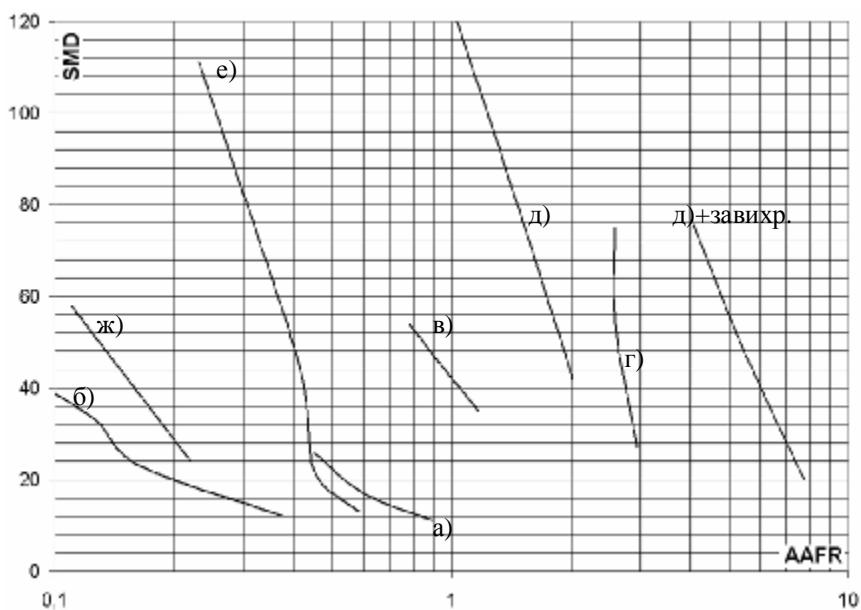


Рис. 5. Зависимость мелкости аэрозолей, генерируемых различными форсуночными устройствами, от отношения расходов воздуха к топливу

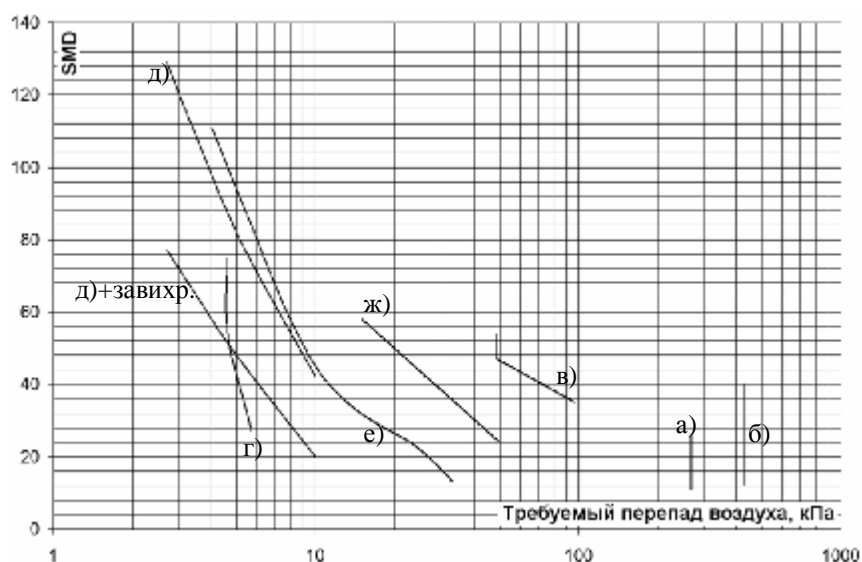


Рис. 6. Зависимость мелкости аэрозолей, генерируемых различными форсуночными устройствами, от максимального (для двух потоков) перепада давления воздуха

вая «в»- позволяет получить удовлетворительную мелкость (порядка 40 мкм) при средних перепадах давления. Кривая для форсунки «д» даже при значительных отношениях AAFR немного не достигает значения в 40 мкм, но для этого форсунке требуется минимальный перепад. При работе совместно с внешним завихрителем происходит дораб- ливание капель топлива, что позволяет еще более снизить необходимый перепад для до- стижения уровня в 20 мкм. Однако дорабо-

танная форсунка типа ПС-90 (кривая «г») по- зволяет получить лучшие результаты по сравнению с кривой «д+завихритель».

В работе [10] приведена зависимость SMD от безразмерного коэффициента K , по- зволяющая сравнивать качество распылива- ния различными пневматическими форсун- ками. Зависимость для исследуемых уст- ройств приведена на рис. 7. Видно, что наи- более удачными получаются устройства, по- казанные на рис. 4.

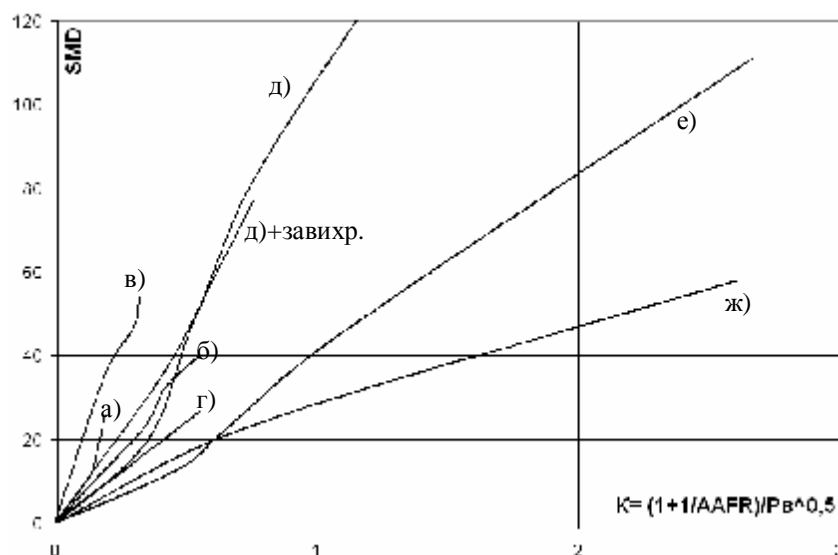


Рис. 7. Сравнение типов распыляющих устройств по качеству распыливания в соответствии с формулой, полученной в работе [10]

Графики на рис. 5-6 помогают упростить выбор типа форсунки при проектировании в зависимости от того, какими возможностями обладает двигатель: подачей большего расхода воздуха на распыл или большим перепадом на фронтальном устройстве. График на рис. 7 позволяет оценить качество разработанного и испытанного распыляющего устройства с точки зрения мелкости распыливания.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 07-08-00573.

Список литературы

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: МИР, 1986.
2. Бородин В. А., Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Ягодкин В. И. Распыливание жидкостей. – М.: Машиностроение, 1967.
3. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984.
4. Kleinstreuer C., Two-Phase Flow: Theory and Applications, New York, 2003.
5. Васильев А. Ю., Свириденков А. А., Третьяков В. В., и др. Экспериментальное определение характеристик пневматических форсунок и их сопоставление с результата-

ми расчетов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. - №2. – 2002. - С.15-20.

6. Furletov V. I., Noil T., Rollin G., Yagodkin V. I., Vasilev A. Yu. Patent EP № 05291870.3.

7. Безменов В. Я., Ягодкин В. И. Акиншин Н. С., Васильев А. Ю. Патент РФ №2003115177 «Низконапорная форсунка и способ распыла топлива», Дата публикации: 2004.11.20.

8. Васильев А. Ю., Майорова А. И., Свириденков А. А., Ягодкин В. И. Проектирование и экспериментальное исследование форсуночных модулей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. - 2006. - № 2(10). Часть 2. - С. 131-135.

9. Фурлетов В. И., Ягодкин В. И., и др. Проектирование и исследование форсуночного модуля со струйной аэрацией топливовоздушного факела, для малоэмиссионных камер сгорания // Сборник ЦИАМ 2001-2005. Основные результаты научно-технической деятельности. Том 1. - М.: ЦИАМ. – С. 450-454.

10. O'Shaughnessy P.J., Bideau R.J., Quing-ping Zheng, 1998, "Injector geometry effect in plain jet airblast atomization", ASME, 9867-445.