

Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 2. С. 88–99
Thermal processes in engineering, 2026, vol. 18, no. 2, pp. 88–99

Научная статья
УДК 621.452.3.034+629.735.33.01+629.7.036.3+537.212
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187723>
EDN: <https://www.elibrary.ru/RZXRAW>

Разработка новых форсунок повышенного ресурса с наружными рубашками охлаждения для воздушно-реактивных двигателей на жидких и газообразных углеводородных горючих и охладителях

В.А. Алтунин¹✉, К.В. Алтунин², М.Р. Абдуллин³, К.В. Пронин⁴, А.А. Юсупов⁵,
М.Л. Яновская⁶

^{1,2,3,4,5}КНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Российская Федерация

⁶ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Российская Федерация

¹altspacevi@yahoo.com✉

Аннотация. В статье проведен анализ тепловых процессов в жидких и газообразных углеводородных горючих и охладителях при их использовании в двигателях летательных аппаратов и наземных энергоустановках. Установлено, что одним из негативных и опасных процессов является процесс осадкообразования, который происходит, в первую очередь, в топливных форсунках. Показаны результаты экспериментального исследования тепловых процессов в жидких и газообразных углеводородных горючих и охладителях без влияния и с влиянием электростатических полей. Установлено, что электрический ветер в жидких и газообразных углеводородных горючих и охладителях способствует предотвращению осадкообразования, интенсификации теплоотдачи и охлаждению форсунки. На базе результатов этих исследований разработана новая конструктивная схема топливной форсунки воздушно-реактивного двигателя с наружной рубашкой охлаждения, в которой расположены рабочие соосные иглы для создания электрического ветра.

Показано, что ресурс такой форсунки может быть увеличен в два и более раз, по сравнению со штатной форсункой воздушно-реактивного двигателя или наземной газотурбинной энергоустановки.

Ключевые слова: форсунка, углеводородное горючее, осадкообразование и борьба с ним, электростатические поля, электрический ветер

Для цитирования. Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Пронин К.В., Юсупов А.А., Яновская М.Л. Разработка новых форсунок повышенного ресурса с наружными рубашками охлаждения для воздушно-реактивных двигателей на жидких и газообразных углеводородных горючих и охладителях // Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 2. С. 88–99. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187723>

Original article

Development of new long-life injectors with external cooling jackets for air-jet engines with liquid and gaseous hydrocarbon fuel and coolants

V.A. Altunin¹✉, K.V. Altunin², M.R. Abdullin³, K.V. Pronin⁴, A.A. Yusupov⁵,
M.L. Yanovskaya⁶

^{1,2,3,4,5}KNITU named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation

⁶CIAM named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation

¹altspacevi@yahoo.com✉

Abstract. This article addresses the challenges of controlling deposit formation in fuel injectors of jet engines and ground power plants. An analysis of thermal processes in liquid and gaseous hydrocarbon fuels and coolants during their use in aircraft engines and ground power plants is provided. One of the negative and dangerous thermal processes is deposit formation, which occurs primarily in fuel injectors. Experiments have shown that deposit formation in liquid hydrocarbon fuels and coolants begins at a temperature of 373 K. Deposit formation leads to partial and complete coking of all injector components. Partial coking partially reduces actual engine thrust and can lead to unintended jet spray of liquid hydrocarbon fuel, which can lead to burnout of the combustion chamber, fire, and explosion. Complete coking leads to a complete loss of thrust, liquid hydrocarbon fuel leaks, fire, and explosion. One existing method for combating deposit formation is the use of anti-deposit additives to liquid hydrocarbon fuels. However, these additives only work (i.e., prevent deposit formation) up to a temperature of 473 K. As the injector wall temperature rises further, deposits begin to form again. A new and promising method for combating deposit formation in liquid hydrocarbon fuels and coolants is to reduce the temperature of the heated injector to 373 K or less. This temperature can be achieved by strategically placing an external cooling jacket on the injector deflector, where liquid hydrocarbon fuel can be used as a coolant. However, solid carbon deposits can form and grow on the inner walls of the injector's external cooling jacket, which will ultimately lead to general heating of the entire injector and deposits on all its internal components. The authors of the article previously experimentally established that electrostatic fields not only enhance heat transfer to liquid hydrocarbon fuels but also prevent deposit formation in the area of electrostatic field lines. Therefore, the authors proposed placing electrostatic fields with needle-to-needle electrodes inside the injector's outer cooling jacket channel. These electrodes generate an electric wind, which not only enhances heat transfer and prevents deposit formation but also enables forced convection of the coolant within the cooling jacket, subsequently feeding it into the injector's internal channels and atomizing it for combustion in the event of a malfunction of the standard fuel pump. The service life of such a nozzle can be increased by two or more times, compared to a standard nozzle of an air-breathing engine or a ground-based gas turbine power plant.

Keywords: injector, hydrocarbon fuel, sediment formation and control, electrostatic fields, electric wind

For citation. Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Pronin K.V., Yusupov A.A., Yanovskaya M.L. Development of new long-life injectors with external cooling jackets for air-jet engines with liquid and gaseous hydrocarbon fuel and coolants. *Thermal processes in engineering*. 2026, vol. 18, no. 2, pp. 88–99. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187723>

Введение

Процесс осадкообразования (δ_{oc}) в жидких углеводородных горючих и охладителях (УВГ и УВО) оказывает очень негативное влияние на работу двигателей, энергоустановок (ЭУ) и техносистем (ТС) наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования [1–5]. К наземным ЭУ можно отнести: газоперекачивающие агрегаты (ГПА), газотурбинные установки (ГТУ), транспортные и другие техносистемы (ТС).

Процесс осадкообразования в топливной системе воздушно-реактивных двигателей (ВРД), газотурбинных двигателей (ГТД) летательных аппаратов (ЛА) приводит [2–9]:

- к преждевременному закупориванию различных фильтров;
- к заседанию золотников в насосах-регуляторах, что ведет к «зависанию» оборотов двигателя при числе оборотов, составляющем (60–70) % от максимальных;
- к повышению времени приемлемости или к помпажу двигателя, к колебанию оборотов или невыходу двигателя на максимальные обороты из-за отложений на прецизионных парах, к самовыключению двигателя на земле и в воздухе или к «раскрутке» оборотов на высоте из-за заедания поршня золотника ограничителя нарастания давления или зависания штока сервопоршня, гидрозамедлителя и т. п.;
- к частичному или полному закупориванию форсуночных фильтров и форсуночных каналов, что ведет к частичной или полной потере тяги, к неправильной организации распыла (например, струйного) и горения, к изменению эпюры температурного поля газового потока, к короблению и прогару стенок жаровых труб и возгоранию двигателя;
- к частичной и полной потере тяги;
- к образованию течи УВГ и УВО, пожара и взрыва;
- к неуправляемости и срыву полетного задания и т. д.;
- к коррозии и досрочному разрушению топливно-охлаждающих каналов двигателей, ЭУ и ТС одно- и многократного использования.

Известно [6–10], что при эксплуатации ВРД, ГТД ЛА, наземных ЭУ и ТС на жидких УВГ и УВО происходит сокращение ресурса и воз-

никают аварийные ситуации из-за негативного процесса осадкообразования в форсунках, например, форсунки ВРД марки НК-8-2У самолета Ту-154 через 900 циклов (часов) эксплуатации полностью закоксовываются, что может привести к различным аварийным ситуациям, связанным с потерей тяги, с образованием течи топлива, с пожаром и взрывом. Так, частичное закоксовывание форсунок может привести к частичной потере тяги. Кроме того, частичное закоксовывание даже только одной форсунки может привести к нерасчетному струйному распылу, к прогару жаровой трубы, к пожару и взрыву двигателя и всего ЛА или наземной ЭУ и ТС. Процесс осадкообразования (δ_{oc}) является сложным и зависит от многих факторов [4–10], но самым главным фактором является температура нагреваемой металлической стенки деталей топливной системы, в том числе, и форсунок.

Одним из существующих способов борьбы с осадкообразованием в жидких УВГ и УВО является способ внедрения различных присадок на нефтеперерабатывающих заводах [6–10]. Однако эти присадки предотвращают осадкообразование только до температуры 473 К, а при дальнейшем повышении нагрева металлической стенки, например, форсунки, твердый осадок появляется, растет и выводит форсунку и весь двигатель ЛА или наземной ЭУ и ТС из строя. Гораздо легче, безопаснее и экономически выгоднее вести борьбу с осадкообразованием уже на ранней стадии проектирования, расчета и создания двигателей ЛА, наземных ЭУ и ТС, чем организовывать их очистку в ходе эксплуатации, без их разборки или с их разборкой и ремонтом в заводских условиях. Поэтому необходимо заранее организовывать борьбу с этим очень опасным и негативным процессом уже в ходе проектирования, расчета и создания форсунок и самих двигателей ЛА, наземных ЭУ и ТС.

Ранее экспериментально В.А. Алтуниным было обнаружено, что электростатические поля (E) способствуют [7]: предотвращению осадкообразования в жидких и газообразных УВГ и УВО; интенсификации теплоотдачи к жидким и газообразным УВГ и УВО. Так же им был разработан новый и перспективный способ борьбы с осадкообразованием в жидких и газообразных УВГ и УВО путем применения E . Для создания E в жидких и газообразных УВГ и УВО

применялась самая эффективная система рабочих электродов типа «Игла – игла» [7].

Целью данной статьи является разработка новой конструктивной схемы форсунки ВРД ЛА с наружной рубашкой охлаждения, в которой заложены различные существующие и перспективные способы борьбы с осадкообразованием: без влияния E ; с влиянием E ; гибридный (одновременное применение первых двух способов) [6–27].

Тема данной статьи является весьма актуальной, т. к. связана с дальнейшим повышением ресурса, надежности, эффективности, безопасности, экономичности и экологичности топливных форсунок ВРД ЛА и наземных ЭУ и ТС.

Данная статья является продолжением ранее опубликованной статьи [25], в которой была показана разработка новой конструктивной схемы топливной форсунки ВРД с наружной рубашкой охлаждения, во внутренней части которой были применены способы борьбы с осадкообразованием без E , на что авторами данной статьи был получен патент на изобретение РФ [22].

Разработка новой конструктивной схемы эффективной форсунки

Авторами статьи были проведены экспериментальные исследования с жидкими и газообразными УВГ и УВО при их естественной и вынужденной конвекции, без применения и с применением E , результаты которых были использованы при создании новой конструктивной схемы эффективной топливной форсунки [6–27]. За основу была принята конструктивная схема штатной топливной форсунки авиационного ВРД марки НК-8-2У. В этой форсунке отсутствуют какие-либо существующие или перспективные способы борьбы с осадкообразованием. На основе этой форсунки ранее авторами данной статьи были разработаны и запатентованы новые конструктивные схемы форсунок, в которых заложены различные способы борьбы с осадкообразованием [19–21], эти форсунки также можно считать аналогами разрабатываемой в данной статье новой конструктивной схемы топливной эффективной форсунки. Однако в этих форсунках отсутствуют: наружная рубашка охлаждения; рабочие соосные иглы для создания E во внутреннем объеме рубашки охлаждения.

Наиболее близким аналогом, т. е. прототипом, можно считать форсунку с наружной рубашкой охлаждения, показанную и описанную авторами данной статьи в их патенте на изобретение РФ № 2810865 [22] и в их предыдущей статье [25]. В этой форсунке за счет наружной рубашки охлаждения происходит охлаждение ее деталей до температуры 373 К и ниже, что предохраняет их от осадкообразования. Однако в ходе эксплуатации такой форсунки негативный процесс осадкообразования возможен и внутри самой наружной рубашки охлаждения, что может привести к выходу из строя ее и всей форсунки в целом, с дальнейшими негативными и опасными процессами, связанными с выходом из строя всего двигателя или ЭУ, а также с пожаром и взрывом, в том числе и ЛА, ЭУ и ТС. Для борьбы с осадкообразованием внутри наружной рубашки охлаждения данной форсунки был предложен и запатентован новый способ без применения E – способ ограничения роста твердого углеродистого осадка путем создания искусственной шероховатости в виде конической резьбы с высотой зубьев 3–5 мм, где рост осада ограничивается на высоту зубьев [23]. В этой же конструктивной схеме форсунки [22], при использовании жидких УВГ и УВО, также было предложено: в ее рубашке охлаждения поддерживать зону критических давлений, т. к. из-за ТФС жидких УВГ и УВО будет происходить увеличение коэффициента теплоотдачи в 2–3 раза, а это означает, что будет происходить более надежное охлаждение стенок рубашки охлаждения форсунки и самой форсунки, что, в свою очередь, будет осуществляться более надежная защита от осадкообразования.

В разрабатываемой и предлагаемой в данной статье новой эффективной форсунке можно использовать еще один новый способ борьбы с осадкообразованием внутри наружной рубашки охлаждения без применения E – это способ замедления роста осадка путем создания полированной поверхности, однако через увеличенное (в 2–3 раза) время осадок в итоге будет иметь такую же толщину, как и при поверхности с естественной шероховатостью [6–12]. Если в наружной рубашке охлаждения разрабатываемой в данной статье новой эффективной форсунки применить новый способ борьбы с осадкообразованием при помощи E , то они будут

предотвращать возникновение твердого углеродистого осадка – независимо от степени и вида естественной или искусственной шероховатости, а увеличение коэффициента теплоотдачи к жидким УВГ и УВО в зоне критических давлений из-за ТФС и влияния электрического ветра – возможно до 650 %. В случае применения газообразных УВГ (УВО) и размещения в рубашке охлаждения эффективной форсунки рабочих соосных игл с *E* тоже будет приводить к положительным эффектам по предотвращению осадкообразования и интенсификации теплоотдачи. В итоге – применение *E* в рубашке охлаждения топливной эффективной форсунки также будет способствовать понижению температуры всех деталей и каналов форсунки, в том числе до 373 К и ниже, что будет предотвращать негативный процесс осадкообразования не только внутри рубашки охлаждения, но и во всей форсунке.

На рис. 1 изображена штатная форсунка ГТД марки НК-8-2У [6–14, 18–22], состоящая из корпуса 1 с двумя отверстиями для подвода топлива 2, 8, выполненного за одно целое с лопатками завихрителя 4 и смесительной втулкой (ее еще называют или смесительной камерой форсунки, или отражателем форсунки) 5, центробежного распылителя 6, топливного сетчатого фильтра 3, гайки 10 для крепления к плите и уплотнительных колец 7, 9.

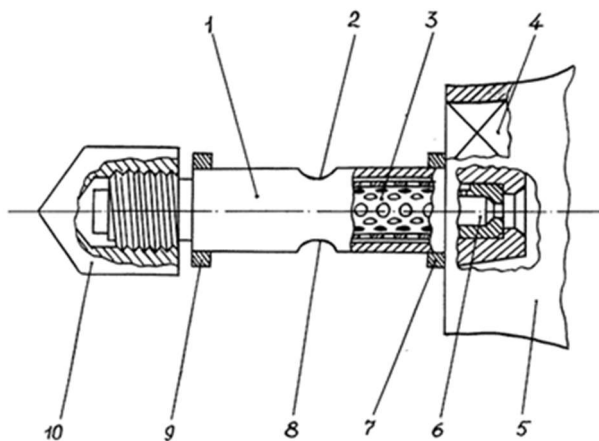


Рис. 1. Конструктивная схема (в разрезе) штатной топливной форсунки ВРД марки НК-8-2У

На рис. 2 показана модернизированная штатная форсунка с наружной рубашкой охлаждения, где 11 – это стенка наружной рубашки охлаждения форсунки, 12 – это внутренняя полость наружной рубашки охлаждения форсунки.

Входной канал рубашки охлаждения форсунки возможно создавать различной конструкции, под различными углами входа и т. д. Это же относится и к выходному каналу форсунки. Например, на рис. 3 представлен вариант наружной рубашки охлаждения форсунки, где 13 – это входной канал наружной рубашки охлаждения форсунки (он расположен сверху корпуса рубашки охлаждения); 14 – выходной канал наружной рубашки охлаждения форсунки (он расположен внизу корпуса рубашки охлаждения).

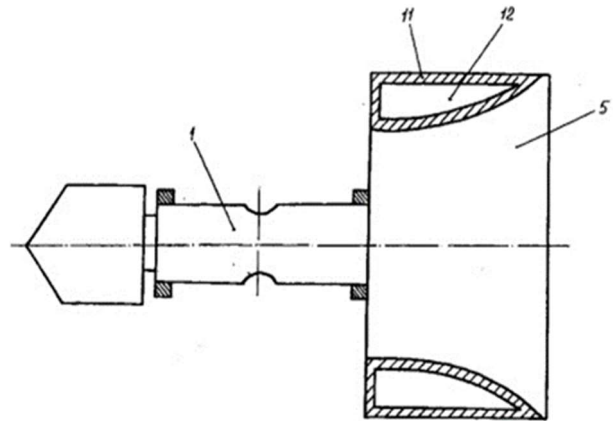


Рис. 2. Модернизированная штатная топливная форсунка с наружной рубашкой охлаждения в разрезе

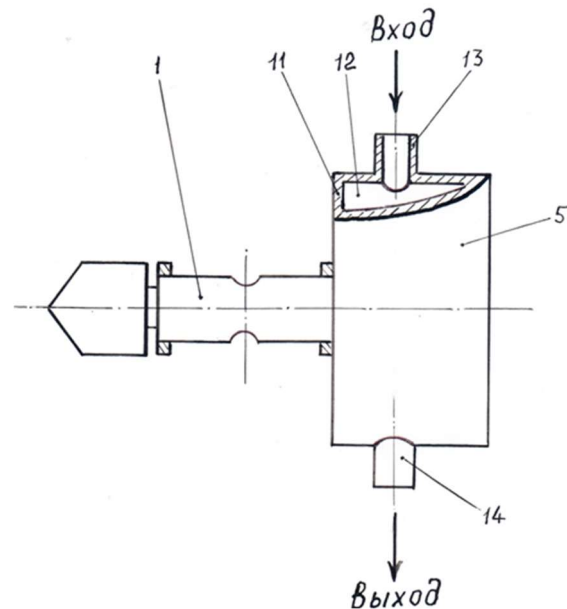


Рис. 3. Вариант модернизированной штатной топливной форсунки с входным и выходным каналами наружной рубашки охлаждения

На рис. 4 показан вид штатной форсунки с наружной рубашкой охлаждения со стороны

распыления горючего через выходной канал распылителя 27, его смешения с воздухом через воздушные каналы внутренней стенки форсунки 26 и организацией процесса горения, где в объеме рубашки охлаждения размещено шесть пар соосных рабочих игл, среди которых: в левой части рубашки охлаждения (показано в разрезе) отдающими являются иглы 22, 20, 18, а принимающими – иглы 21, 19, 15; в правой части рубашки охлаждения отдающими являются иглы 23, 25, 29, а принимающими – иглы 24, 28, 30. Все соосные рабочие иглы имеют одинаковую индивидуальную электро-гидроизоляцию (электро-гидроизоляторы) 16, конструктивно расположенную в наружной стенке рубашки охлаждения 11.

Острие 17 каждой иглы загнуто на 90° . В каждой паре соосных рабочих игл острие отдающей иглы и острие принимающей иглы всегда конструктивно направлены навстречу друг другу.

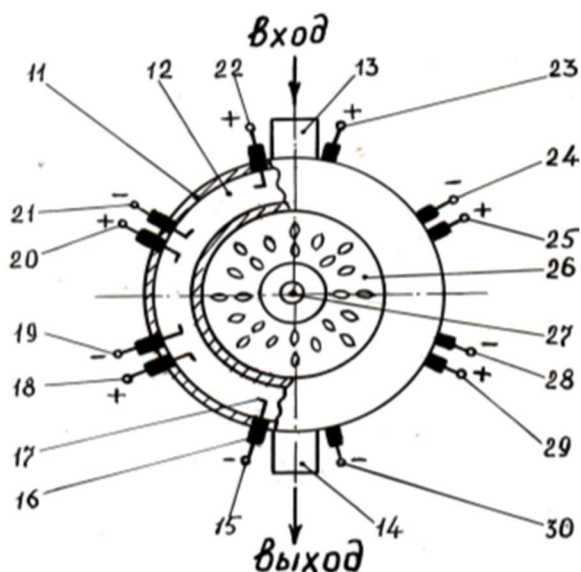


Рис. 4. Размещение рабочих соосных игл внутри наружной рубашки охлаждения модернизированной топливной форсунки

При включении электростатического напряжения между отдающими и принимающими иглами (например, см. рис. 5), расположенными на расстоянии h , в среде жидкого или газообразного УВГ (УВО) в наружной рубашке охлаждения форсунки будут устанавливаться внутренние силовые линии 31 и внешние силовые линии 32, где внешние силовые линии 32, а также частично и внутренние силовые линии 31, близко расположенные к внешним, будут про-

ходить по внутренним стенкам наружной рубашки охлаждения форсунки и предотвращать на них негативный процесс осадкообразования. Однако расчеты показали, что такое расположение рабочих соосных игл будет недостаточно для предотвращения осадкообразования на всей внутренней поверхности рубашки охлаждения. Поэтому для дальнейшего повышения эффективности борьбы с осадкообразованием на внутренних стенках наружной рубашки охлаждения форсунки, т. е. для более полного охвата всех внутренних стенок наружной рубашки охлаждения силовыми линиями E , предлагается каждую пару соосных рабочих игл заменить на новую пару, которая конструктивно будет состоять из трех отдающих 33 и трех принимающих 36 игл, имеющих по одному общему входу, как показано на рис. 6.

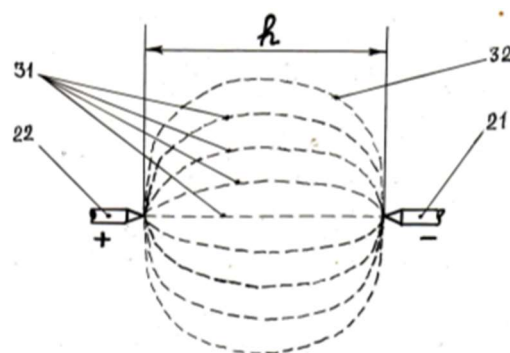


Рис. 5. Общий вид распространения и конфигурации силовых линий E внутри рубашки охлаждения топливной форсунки от одной пары рабочих соосных игл

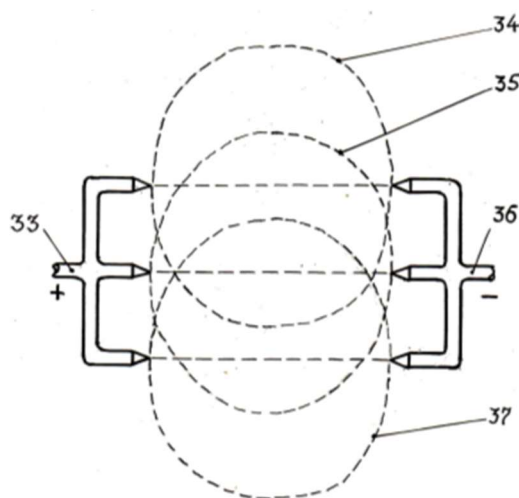


Рис. 6. Общий вид распространения и конфигурации силовых линий E внутри рубашки охлаждения топливной форсунки одновременно от трех пар рабочих соосных игл

Внешние силовые линии 34, 35, 37 от этих трех пар соосных рабочих игл, а также от всех остальных пар будут охватывать практически всю внутреннюю область рубашки охлаждения форсунки и предотвращать осадкообразование практически на всех ее внутренних поверхностях.

Работа наружной рубашки охлаждения новой эффективной форсунки

Рассмотрим работу наружной рубашки охлаждения новой эффективной форсунки с E для регенеративной и раздельной конструктивных систем охлаждения форсунки. При поступлении жидкого (или газообразного) УВГ (УВО) через входной канал 13 (см. рис. 4) данный поток делится на две части: на левую и правую, а при прохождении выходного канала 14 (см. рис. 4) эти оба потока снова объединяются в один общий поток. Острие каждой отдающей иглы в левой и правой частях рубашки охлаждения форсунки (см. рис. 4) направлено именно по ходу потока горючего (охлаждителя), чтобы электрический ветер имел одинаковое направление с направлением потока горючего (охлаждителя) и способствовал продвижению горючего (охлаждителя) по левому (против часовой стрелки) и правому (по часовой стрелке) каналам рубашки охлаждения форсунки.

Для замкнутой системы охлаждения новой эффективной форсунки, когда жидкое (или газообразное) УВГ (УВО) находится в замкнутом объеме наружной рубашки охлаждения и вращается от влияния электрического ветра (см. рис. 4), например, против часовой стрелки, необходимо в правой половине канала рубашки охлаждения конструктивно обеспечить подключение электростатического напряжения на отдающие иглы – точно также, как и в левой, т. е. отдающими рабочими соосными иглами (со знаком «плюс») должны стать принимающие иглы 30, 28, 24, которые изображены на рис. 4 со знаком «минус», а принимающими соосными рабочими иглами (со знаком «минус») должны стать отдающие иглы 23, 25, 29, которые изображены на рис. 4 со знаком («плюс»).

С целью повышения эффективности предотвращения осадкообразования на внутренних стенках наружной рубашки охлаждения данной

форсунки, включение в работу E (т. е. подачу высоковольтного электростатического напряжения на отдающую иглу) необходимо осуществлять в постоянном режиме сразу после заполнения объема рубашки охлаждения горючим (охладителем), т. е. практически через 10–20 секунд после запуска двигателя, ЭУ или ТС, что будет надежно обеспечивать эффективную работу E по предотвращению осадкообразования, т. к. E должны начать свою работу еще до нагрева форсунки до 373 К, т. е. до начала негативного процесса осадкообразования. Кроме того, при использовании газообразного УВГ (УВО) необходимо и обязательно перед включением E создать в рубашке наружного охлаждения форсунки именно только газовую среду без каких-либо воздушных примесей, т. к. смесь газообразного УВГ (УВО) с воздухом является опасной средой, которая может привести к взрыву при случайном возникновении пробойного разряда (искры) между соосными рабочими иглами. Это требование, даже и без использования E , является основным для всех двигателей, транспортных и других ТС, работающих на газообразных УВГ (УВО), т. е. всегда и везде необходимо соблюдать основное требование – не допускать смешения газообразного УВГ (УВО) с воздухом во всех топливных и охлаждающих каналах, расположенных до камеры сгорания, в которой происходит официальное смешение газообразного УВГ (УВО) с воздухом с дальнейшим розжигом этой горючей смеси и ее горением.

Отключение E (высоковольтного электростатического напряжения) необходимо осуществлять после окончания работы и выключения двигателя, ЭУ и ТС, но только при охлаждении форсунки до температур менее 373 К, т. к. при таких температурах осадкообразование не происходит. Для обеспечения таких технических условий необходимо, чтобы жидкий (или газообразный) УВО после отключения двигателя, ЭУ и ТС продолжал находиться в объеме наружной рубашки охлаждения. Обычно после останова двигателя (ВРД, ГТД) производится продувка воздухом всех форсунок, чтобы удалить остатки топлива. Но для эффективной работы E по предотвращению осадкообразования после останова двигателя, ЭУ и ТС необходимо создать именно такие условия в объеме наруж-

ной рубашки охлаждения, т. е. необходимо обеспечить заполнение этого объема жидким (или газообразным) УВГ (или их жидкими или газообразными смесями) в условиях вынужденной или естественной конвекции, а только после понижения температуры деталей форсунки до 373 К и ниже – организовывать продувку двигателя, ЭУ и ТС воздухом.

Рассмотрим возможные варианты выполнения этих технических условий для различных конструктивных схем систем охлаждаемых форсунок:

а) для регенеративной конструктивной схемы (когда горючее (охладитель) сначала поступает в рубашку наружного охлаждения форсунки, а только потом – в топливоподающий канал к топливному фильтру и распылителю, а далее – на сжигание): необходимо электромагнитный клапан отсечения подачи горючего (охладителя) при останове двигателя размещать на выходе из канала рубашки наружного охлаждения форсунки с обеспечением продолжения движения горючего (охладителя) по резервному отводному каналу с дальнейшим его сливом в топливный бак; при этом также необходимо обеспечивать работу штатного топливного насоса, а его отключение производить только после остывания форсунки до температуры 373 К и меньше; в случае отказа штатного топливного насоса (например, при его поломке) функцию обеспечения вынужденной конвекции горючего (охладителя) через наружную рубашку охлаждения возможно переложить на E , т. е. на электрический ветер, который в этот период будет находиться во включенном состоянии и будет работать в режиме электродинамического насоса, его отключение необходимо обеспечить при охлаждении форсунки до температуры 373 К и меньше;

б) для отдельной конструктивной схемы (когда жидкое (или газообразное) горючее (охладитель) сначала поступает в рубашку наружного охлаждения форсунки, а потом – обратно в общий (или дополнительный) топливный бак или в топливный коллектор: необходимо обеспечить работу индивидуального топливного насоса (который обеспечивает функционирование только наружной рубашки охлаждения), а его отключение производить при охлаждении форсунки до температуры 373 К и меньше; в случае выхода

из строя индивидуального топливного насоса возможно использовать включенные в этот период E , где электрический ветер будет работать в режиме электрогидродинамического насоса, его отключение необходимо обеспечить при охлаждении форсунки до температуры 373 К и меньше;

в) для замкнутой конструктивной схемы (когда жидкое (или газообразное) горючее (охладитель) закачивается и находится только внутри объема наружной рубашки охлаждения форсунки в условиях естественной конвекции и турбулизируется влиянием E (электрического ветра): отключение E и слив горючего (охладителя) из рубашки охлаждения форсунки в основной или дополнительный топливный бак – необходимо осуществлять только при охлаждении форсунки до температуры 373 К и меньше;

г) для смешанной конструктивной схемы – возможны различные общие варианты первых трех схем, где, например: регенеративная схема будет являться основной, а отдельная схема – вспомогательной – для аварийных ситуаций; отдельная схема будет основной, а замкнутая схема – вспомогательной – для аварийных ситуаций; возможно объединение сразу всех трех схем, где, например, регенеративная схема будет основной, а отдельная и замкнутая схема – будут созданы для аварийных ситуаций; возможны и другие варианты;

д) продувку воздухом наружной рубашки охлаждения форсунки любой конструктивной схемы (регенеративной, отдельной, замкнутой, смешанной) для удаления из нее остатков горючего (охладителя) по конструктивно предусмотренным отводящим каналам наружу – необходимо проводить только после отключения E (высоковольтного электростатического напряжения).

В ходе работы E будет осуществляться и обеспечиваться не только процесс предотвращения осадкообразования на внутренних стенках наружной рубашки охлаждения форсунки любой конструктивной схемы, но и другие положительные эффекты и процессы, например:

1) процесс интенсификации теплоотдачи к жидкому (или газообразному) УВГ (УВО) внутри наружной рубашки охлаждения, что будет повышать эффективность охлаждения всей форсунки;

2) процесс полной предтопливной подготовки: ионизация, смешение, гомогенизация (смешение двух и более горючих и образование нового смесового горючего с новыми энергетическими, теплофизическими и другими свойствами), что будет приводить к повышению качества распыла, полноты сгорания, тяги и экологичности процесса горения, а кроме того, также открывается возможность применения в качестве горючего (охлаждителя) не одного, а сразу двух и более жидких УВГ (УВО), что очень важно, особенно в сложных климатических и боевых условиях (в том числе при освоении Арктики и при проведении СВО), например, при эксплуатации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), ракетно-артиллерийского вооружения (РАВ), вооружения и военной техники (ВВТ) одно – и многозарядного использования на жидком УВГ (УВО) при наличии малого объема штатного горючего (охлаждителя) или вообще при его отсутствии; данная форсунка с эффективной рубашкой охлаждения с E может работать как на жидком УВГ, так и на их различных смесях, а также – на газообразном УВГ и на их различных смесях;

3) процесс создания вынужденной конвекции жидкого (газообразного) УВГ (УВО) внутри наружной рубашки охлаждения форсунки за счет работы электрического ветра, который имеет свою гидродинамику (газодинамику), а точнее – электро-гидродинамику (электро-газодинамику); данный способ создания вынужденной конвекции УВГ (УВО) возможно применять:

а) при аварийных ситуациях в общей системе топливоподачи двигателя ЛА, наземной ЭУ, ТС и регенеративного охлаждения форсунки;

б) при создании и эксплуатации конструктивной схемы системы охлаждения форсунки отдельного (индивидуального) типа (т. е. независимо от общей насосной топливной системы) с применением отдельного насоса – в случае аварийной ситуации при выходе его из строя;

в) при создании и эксплуатации конструктивной схемы системы охлаждения форсунки отдельного (индивидуального) типа (т. е. независимо от общей насосной топливной системы) с применением E вместо обычного насоса – для создания электрического ветра и гидродинамики;

г) при создании и эксплуатации конструктивной схемы системы охлаждения форсунки раз-

дельного (индивидуального) закрытого типа (т. е. независимо от общей насосной топливной системы, в замкнутом объеме наружной рубашки охлаждения форсунки) с применением E для создания электрического ветра, который в условиях естественной конвекции жидкого (или газообразного) УВГ (УВО) будет обеспечивать предотвращение осадкообразования, турбулилизацию и движение горючего (охлаждителя) во внутреннем канале наружной рубашки охлаждения (по часовой или против часовой стрелки), а также интенсификацию теплоотдачи, т. е. интенсификацию охлаждения наружной рубашки охлаждения и всех внутренних деталей форсунки.

Разрабатываемая новая эффективная топливная форсунка будет отличаться от предыдущей конструктивной схемы форсунки без применения E тем, что:

– конструктивная схема наружной рубашки охлаждения форсунки выполнена или регенеративной, или раздельной, или замкнутой, или смешанной с использованием жидкого или газообразного УВГ (УВО) или смесей двух и более жидких или газообразных УВГ (УВО);

– внутренняя поверхность металлических стенок наружной рубашки охлаждения форсунки выполнена: или гладкой (полированной), или с естественной шероховатостью, или с искусственной шероховатостью виде кольцевых конических нарезок или винтовой конической резьбы с высотой зубьев (3–5) мм;

– внутри наружной рубашки охлаждения конструктивно через электро-гидроизоляторы по системе «Игла – игла» размещено несколько пар рабочих соосных игл, причем одни из игл являются отдающими и на них подается высоковольтное электростатическое напряжение с дальнейшим истеканием электрического ветра, а другие – принимающими, где каждая игла имеет острие, отогнутое на 90° , в каждой паре соосных рабочих игл острие отдающей иглы и острие принимающей иглы всегда конструктивно направлены навстречу друг другу, причем острие отдающей иглы всегда направлено по потоку жидкого (или газообразного) горючего (охлаждителя), оптимальные расстояния между остриями рабочих соосных игл и оптимальные величины подаваемых высоковольтных электростатических напряжений выбираются и устанавливаются или путем проведения экспериментальных исследо-

ваний, или путем применения экспериментальной базы данных, или путем расчета по экспериментальным формулам;

- каждая пара соосных рабочих игл конструктивно заменена на новую пару, состоящую из трех отдающих и трех принимающих соосных игл, имеющих по одному общему входу;

- подключение высоковольтного электростатического напряжения на отдающие иглы осуществляется в постоянном режиме через 10–20 секунд после начала запуска двигателя, ЭУ или ТС при полном заполнении объема рубашки наружного охлаждения форсунки жидким (или газообразным) УВГ (УВО), а выключение – после останова двигателя, также при заполненном объеме рубашки наружного охлаждения форсунки жидким (или газообразным) УВГ (УВО), ЭУ или ТС, но только после охлаждения деталей форсунки до температур менее 373К;

- максимально возможное повышение коэффициента теплоотдачи к жидким УВГ (УВО) в рубашке наружного охлаждения форсунки обеспечивается путем применения E в зоне критических давлений, а к газообразным УВГ (УВО) – при максимально возможном давлении;

- продувка канала наружной рубашки охлаждения форсунки воздухом производится после останова двигателя, ЭУ или ТС и только после отключения E .

Ресурс такой эффективной форсунки будет надежно увеличен, по сравнению со штатной форсункой, в два и более раз.

На данную конструктивную схему новой эффективной топливной форсунки с наружной рубашкой охлаждения авторы статьи получили патент на изобретение РФ № 2806710 [24].

Заключение

В данной статье проведен анализ негативно-го процесса осадкообразования, происходящий в топливных форсунках реактивных двигателей ЛА и наземных ЭУ и ТС. Рассмотрена конструктивная схема штатной топливной форсунки ГТД марки НК-8-2У, в которой отсутствуют какие-либо способы и методы борьбы с осадкообразованием. Проанализированы новые конструктивные схемы запатентованных авторами статьи топливных форсунок, в которых внедрены существующие и перспективные способы и методы предотвращения, ограничения и удаления осадка

без применения E . Сделано обоснование о необходимости размещения E внутри наружной рубашки охлаждения разрабатываемой эффективной форсунки. Показаны результаты экспериментальных исследований с жидкими и газообразными УВГ (УВО) без применения и с применением E , создана база экспериментальных данных, которую необходимо использовать при проектировании, расчете и создании новых и современных топливных форсунок повышенных характеристик. Показана новая, разработанная авторами статьи, конструктивная схема эффективной топливной форсунки с наружной рубашкой охлаждения, где раскрыты подробности оптимального и правильного расположения рабочих соосных игл в объеме наружной рубашки охлаждения. Открывается возможность применения не только основных жидких или газообразных УВГ (УВО), но и смесей двух и более различных жидких или газообразных УВГ (УВО), с возможностью проведения их полной предтопливной подготовки за счет E , что очень важно, особенно в сложных климатических и боевых условиях.

Применение материалов данной статьи и изобретения [24] будет способствовать созданию новых отечественных форсунок для двигателей ЛА, наземных ЭУ и ТС различного назначения и базирования одно – и многократного использования на жидких и газообразных УВГ и УВО повышенных характеристик по ресурсу, надежности, безопасности, эффективности, неуязвимости и выживаемости, экономичности и экологичности.

Список источников

1. Большаков Г.Ф. Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах. Л.: Химия, 1972. 232 с.
2. Братков А.А. (ред.). Химмотология ракетных и реактивных топлив. М.: Изд-во «Химия», 1987. 304 с.
3. Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П. и др. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив. Справочник. М.: Изд-во «Химия», 1985. 240 с.
4. Мякочин А.С., Яновский Л.С. Образование отложений в топливных системах силовых установок и методы их подавления. М.: Изд-во «МАИ», 2001. 222 с.
5. Яновский Л.С., Дубовкин Н.Ф. и др. Инженерные основы авиационной химмотологии. Казань: Изд-во Казанского университета, 2005. 714 с.

6. Алтуниев В.А. Исследование особенностей теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в энергетических установках многофазового использования. Книга первая. Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова – Ленина, 2005. 272 с.
7. Алтуниев В.А. Исследование влияния электростатических и магнитных полей на особенности теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям. Книга вторая. Казань: Изд-во «Казанский гос. ун-т им. В.И. Ульянова – Ленина», 2006. 230 с.
8. Алтуниев В.А. Влияние критических давлений на тепловые процессы в жидких углеводородных горючих и охладителях. Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2020. 209 с.
9. Алтуниев К.В. Функционально-стоимостной анализ горелочных устройств и форсунок: монография. Казань: Изд-во КНИТУ – КАИ, 2020. 156 с.
10. Алтуниев В.А. Свойства и негативность осадкообразования в двигателях и энергоустановках на жидких углеводородных горючих и охладителях. Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2020. 130 с.
11. Алтуниев К.В. Разработка методики расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки с целью предотвращения осадкообразования и перегрева // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 6. С. 37–47. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-6-37-47
12. Яновский Л.С. (ред.). Некоторые пути повышения эффективности жидкостных реактивных двигателей летательных аппаратов на углеводородных и азото-содержащих горючих и охладителях. Монография. Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2020. 148 с.
13. Алтуниев В.А., Алтуниев К.В., Абдуллин М.Р. и др. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК». Часть 1. // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. № 12. С. 530–542. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-12-530-542
14. Алтуниев В.А., Алтуниев К.В., Абдуллин М.Р. и др. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК». Часть II // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 1. С. 9–21. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-1-9-21
15. Лави А., Мартелли С., Мишо М. и др. Устройство охлаждения топливной форсунки камеры сгорания и топливная форсунка, содержащая это устройство (варианты). Патент RU 2272963. Бюл. № 9, 27.03.2006.
16. Рустоми Б., Гилла П.Д., Пайпер Д.С. и др. Теплоизолированная топливная форсунка для газотурбинного двигателя. Патент RU 2966158. Бюл. № 22, 31.07.2019.
17. Бандару Р.В. (US), Пайпер Д.С., Лайнднер С.М. и др. Газотурбинный агрегат с топливной форсункой, оснащенной внутренним теплозащитным экраном. Патент RU 2672205. Бюл. № 32, 12.11.2018.
18. Кузнецов Н.Д., Радченко В.Д., Татаринев В.В. и др. Головка кольцевой камеры сгорания ГТД. А.с. СССР 240391. 30.01.1983 г.
19. Алтуниев К.В. Форсунка. Патент RU 2388966. Бюл. № 13. 10.05.2010.
20. Алтуниев К.В. Форсунка. Патент RU 2447362. Бюл. № 10. 10.04.2012.
21. Алтуниев В.А. Форсунка // Патент RU 2155910. Бюл. № 25. 10.09.2000.
22. Алтуниев В.А., Алтуниев К.В., Алиев И.Н. и др. Форсунка с наружной рубашкой охлаждения // Патент RU 2810865. Бюл. № 1. 28.12.2023.
23. Алтуниев В.А. Способ интенсификации теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в наземных и космических энергетических установках многофазового использования. Патент RU 2289078. Бюл. № 34. 10.12.2006.
24. Алтуниев В.А., Алтуниев К.В., Алиев И.Н. и др. Форсунка с эффективной рубашкой охлаждения // Патент RU 2806710. Бюл. № 31. 03.11.2023.
25. Алтуниев В.А., Алтуниев К.В., Абдуллин М.А. и др. Разработка новой конструктивной схемы форсунки с наружной рубашкой охлаждения для авиационных воздушно-реактивных двигателей и наземных энергоустановок // Инженерный журнал: наука и инновации. 2025. № 11.
26. Алтуниев В.А., Алтуниев К.В., Алиев И.Н. и др. Способ определения границы начала зоны насыщения электростатическими полями при системе электродов типа «Игла – игла» в замкнутом объеме в среде жидких углеводородных горючих (охладителей). Патент RU 2785830. Бюл. № 35. 14.12.2022.
27. Алтуниев В.А., Алтуниев К.В., Алиев И.Н. и др. Способ определения величины подаваемого электростатического напряжения на отдающую иглу в системе электродов типа «Игла – игла» в замкнутом объеме с жидким углеводородным горючим (охладителем) // Патент RU 2785251. Бюл. № 34. 05.12.2022.

References

1. Bolshakov GF. *Physicochemical bases of sediment formation in jet fuels*. Leningrad: Chemistry; 1972. 232 p.
2. Bratkov AA (ed.). *Chemmotology of rocket and jet fuels*. Moscow: Chemistry; 1987. 304 p.
3. Dubovkin NF, Malanicheva VG, Massur YuP et al. *Physicochemical and operational properties of jet fuels. Handbook*. Moscow: Chemistry; 1985. 240 p.
4. Myakochin AS, Yanovsky LS. *Formation of deposits in fuel systems of power plants and methods for their suppression*. Moscow: MAI; 2001. 222 p.
5. Yanovsky LS, Dubovkin NF et al. *Engineering fundamentals of aviation chemotology*. Kazan: Kazan University; 2005. 714 p.
6. Altunin VA. *Study of heat transfer to hydrocarbon fuels and coolers in reusable power plants. Book 1*. Kazan: Kazan State University named after V.I. Ulyanov–Lenin. 2005. 272 p.
7. Altunin VA. *Study of the Influence of Electrostatic and Magnetic Fields on the Peculiarities of Heat Transfer to Hydrocarbon Fuels and Coolants. Book 2*. Kazan: Ka-

- zan State University named after V.I. Ulyanov–Lenin; 2006. 230 p.
8. Altunin VA. *The Effect of Critical Pressures on Thermal Processes in Liquid Hydrocarbon Fuels and Coolants*. Kazan: Shkola; 2020. 209 p.
 9. Altunin KV. *Functional-dimensional analysis of burner devices and nozzles: monograph*. Kazan: KNITU–KAI; 2020. 156 p.
 10. Altunin VA. *Properties and Negativity of Sediment Formation in Engines and Power Plants Using Liquid Hydrocarbon Fuels and Coolants*. Kazan: Shkola; 2020. 130 p.
 11. Altunin KV. Development of a methodology for calculating the temperature of the inner wall of a multi-fuel nozzle in order to prevent precipitation and overheating. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye*. 2021;(6):37–47. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-6-37-47
 12. Yanovskii LS (ed.). *Some ways to increase the efficiency of liquid jet engines of aircraft on hydrocarbon and nitrogen-containing fuels and coolers*. Kazan: Shkola. 2020. 148 p.
 13. Altunin VA, Altunin KV, Abdullin MR et al. Some ways to improve the engines and power plants of the NK brand. Part 1. *Thermal processes in engineering*. 2021; 13(12):530–542. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-12-530-542
 14. Altunin VA, Altunin KV, Abdullin MR et al. Some ways to improve the engines and power plants of the NK brand. Part 2. *Thermal processes in engineering*. 2022; 14(1):9–21. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-1-9–21
 15. Lavi A, Martelli S, Michaud M et al. *Combustion chamber fuel injector cooling device and fuel injector containing this device (versions)*. Patent RU 2272963. Bul. № 9, 27.03.2006.
 16. Rustomi B, Gill PD, Piper DS et al. *Heat-insulated fuel injector for a gas turbine engine*. Patent RU 2966158. Bul. № 22, 31.07.2019.
 17. Bandaru RV, Piper DS, Lindner SM (et al). *Gas turbine unit with a fuel injector equipped with an internal heat shield*. Patent RU 2672205 Bul. № 32, 12.11.2018.
 18. Kuznetsov ND, Radchenko VD, Tatarinov VV et al. *Head of the annular combustion chamber of the gas turbine engine*. A.S. USSR 240391, 30.01.1983.
 19. Altunin KV. *Nozzle*. Patent RU 2388966, Bul. № 13, 10.05.2010.
 20. Altunin KV. *Nozzle*. Patent RU 2447362. Bul. № 10, 10.04.2012.
 21. Altunin VA. *Nozzle*. Patent RU 2155910. Bul. № 25, 10.09.2000.
 22. Altunin VA, Altunin KV, Aliev IN et al. *Nozzle with an external cooling jacket*. Patent RU 2810865. Bul. № 1, 12.28.2023.
 23. Altunin VA. *Method for intensifying heat transfer to hydrocarbon fuels and coolants in reusable ground and space power plants*. Patent RU 2289078. Bul. № 34, 12.10.2006.
 24. Altunin VA, Altunin KV, Aliev IN et al. *Nozzle with an effective cooling jacket*. Patent RU 2806710. Bul. № 31, 03.11.2023.
 25. Altunin VA, Altunin KV, Abdullin MA et al. Development of a new design scheme of a nozzle with an external cooling jacket for aircraft air-breathing jet engines and ground power plants. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*. 2025;(11).
 26. Altunin VA, Altunin KV, Aliev IN et al. *Method for Determining the Boundary of the Beginning of the Saturation Zone by Electrostatic Fields with a Needle-Needle Electrode System in a Closed Volume in a Medium of Liquid Hydrocarbon Fuels (Coolants)*. Patent RU 2785830. Bul. № 35, 12.14.2022.
 27. Altunin VA, Altunin KV, Aliev IN et al. *Method for Determining the Magnitude of Electrostatic Voltage Applied to a Payoff Needle in a Needle-Needle Electrode System in a Closed Volume with Liquid Hydrocarbon Fuel (Coolant)*. Patent RU 2785251. Bul. № 34, 05.12.2022.