

# ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕГАЗАЦИИ АВИАЦИОННОГО КЕРОСИНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ОБОГРЕВАЕМЫХ ТОПЛИВНЫХ КАНАЛОВ



**Шлякотин Владимир Ефимович**, начальник сектора  
**Горбачев Владимир Николаевич**, ведущий инженер,  
**Соколова Ольга Викторовна**, ведущий инженер,  
**Шихман Юрий Моисеевич**, старший научный сотрудник,  
**Бельков Александр Сергеевич**, начальник стенда  
 ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

*Введена универсальная функция, описывающая процессы насыщения - нормальная функция насыщения, которая может быть использована в различных областях, в том числе для описания неравновесных процессов в ракетных двигателях.*

*С помощью этой функции доказана H-теорема Больцмана и определено понятие энтропии как дисперсии функции распределения.*

*An universal function describing the saturation processes was found. It is called a normal saturation function and can be used in various fields, including for describing nonequilibrium processes in rocket engines.*

*With the help of this function, the Boltzmann H-theorem is proved and entropy concept is defined as a dispersion of the distribution function.*

**Ключевые слова:** турбулентность, насыщение, константа Больцмана, энтропия.

Проблема создания эффективного высокоскоростного ВРД с высоким уровнем параметров цикла и теплонапряженности заключается в эффективном охлаждении рабочего тела (воздуха) и элементов конструкции. С повышением скорости полета хладоресурса воздуха становится недостаточно, в этом случае необходимо использовать хладоресурс топлива - единственного хладагента на борту. С другой стороны, с ростом общей теплонапряженности конструкции силовой установки (СУ) актуальны требования к повышению ресурса топливоподающих систем и систем впрыска, располагающихся в области повышенных температур (например, трубопроводы и форсунки, находящиеся в непосредственной близости от КС).

Наиболее реалистичным для высокоскоростных ЛА малого и среднего взлетного веса являются СУ работающие на углеводородном топливе (авиационном керосине) с использованием существующей топливной базы и аэродромной инфраструктуры.

Особенностью применения в качестве хладагентов авиационных керосинов в системах охлаждения (СО), теплообменных аппаратах (ТА) и обогреваемых трубопроводах является коксообразование с коксоотложением на поверхностях нагрева в области температур топлив, превышающих пределы их термической стабильности [1, 2] ( $T_{т.мах} = 130...180^{\circ}C$ ) [2]. Так, для керосинов от  $T_{т.мах}$  и до температуры полной газификации проявляется интенсивный процесс коксоотложений, связанный, в частности, с жидкофазным окислением топлива, вследствие неизбежного присутствия растворенного кислорода воздуха в топливе [1], составляющего 3 - 5 об.% при нормальных условиях. Эти отложения, образуясь на внутренней поверхности каналов со временем, вследствие более низкого уровня коэффициента теплопроводности по сравнению с исходным материалом теплопередающей стенки, приводят к значительному росту температуры стенки и ее перегреву, что является основным ограничителем ресурса обогреваемых топливных систем и двигателя в целом. Тем не менее, использование хладоресурса топлива для высокоскоростных и высокотемпературных двигателей пока неизбежно. Поэтому разработка эффективных конструкций СО и ТА и способов снижения коксоотложений является актуальной задачей.

В работе [3] были проведены систематические экспериментальные исследования процессов коксоотложений и наработки модельных топливных каналов с нагревом в них керосина при различных тепловых нагрузках  $q_w=0.2-0.7$  МВт/м<sup>2</sup> как аналогов каналов топливной СО перспективных высокоскоростных ВРД. Опыты выполнялись при электрическом нагреве авиационных керосинов РТ и ТС-1 в трубчатых моделях (нетеплоизолированная

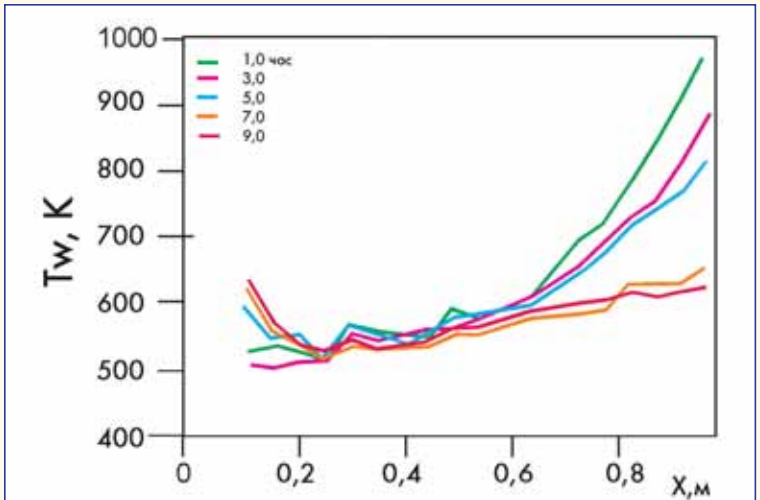


Рис. 1. Характерное распределение температуры наружной поверхности трубки в зависимости от времени наработки

трубка 3.0X0.5 мм, материал 12X18Н9Т длиной 1 м), препарируемых термодарами с наружной стороны. Испытания проводились при температуре топлива на входе  $10 \approx 20^{\circ}C$ , давлении  $\approx 5.0-6.0$  МПа и температурами на выходе  $\approx 240...370^{\circ}C$ , и прекращались по достижению максимальной температуры наружной поверхности  $\approx 700^{\circ}C$ .

На рис. 1 показано характерное распределение температуры наружной поверхности стенки по длине топливного трубчатого канала при различных временах наработки. Видно, что по мере наработки происходит общее повышение температуры наружной поверхности трубки, особенно в области выхода из ТО. Такое поведение температуры стенки связано с коксоотложением на внутренней поверхности трубки (рисунок 2).

На основании проведенного цикла исследова-

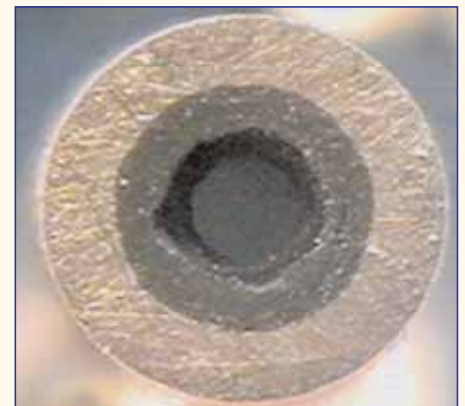


Рис. 2. Пример распределения отложений кокса в сечении максимальной температуры стенки трубки

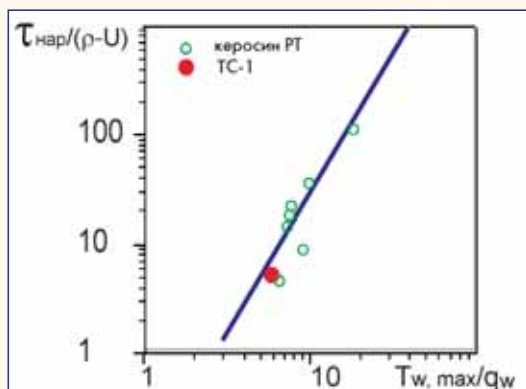


Рис. 3. Зависимость максимального времени наработки топливного канала в условиях коксоотложений

ность позволяет провести экспресс-оценку наработки трубчатых каналов СО.

Ключевым источником коксообразования в жидком топливе при его нагреве является растворенный в топливе кислород воздуха. В этом случае устройство, позволяющее значительно снизить склонность нагреваемого топлива к коксоотложению, должно исключить первопричину этого процесса. В [1] представлены экспериментальные данные по изменению скорости перегрева стенки (прямая характеристика наличия коксоотложений) в зависимости от содержания растворенного кислорода в n-октане, протекающего в нагреваемом канале (практически линейная зависимость) из которых следует, что при снижении количества растворенного кислорода  $\%O_2 \rightarrow 0$ , в пределе  $T_w \rightarrow 0$ . Отметим, что механизм процесса коксообразования и коксоотложения достаточно сложен и зависит так же от наличия примесей (меркаптаны, смолы и пр.) растворенных в авиационном керосине, пусть и в небольших количествах. Избавление от них также благотворно сказывается на снижении уровня коксоотложений [1].

Следовательно, одним из способов повышения ресурса топливных систем охлаждения может стать разработка устройств кондиционирования (дегазации) авиационного керосина для удаления из него растворенного кислорода воздуха. При этом устройство, предположительно, должно размещаться на двигателе (как дополнительный узел топливной системы) и обеспечивать проточную и безнагревную дегазацию. Размещение дегазатора на двигателе определяет требования к его массово-габаритным параметрам, а требования безнагревности - возможность максимального сохранения располагаемого физического хладоресурса керосина. Очистка керосина от растворенного кислорода позволит значительно снизить уровень коксоотложений в обогреваемых топливных каналах и увеличить температурный интервал нагрева вплоть до температур начала его термического разложения ( $\approx 800-850$  К) [1]. Этим требованиям во многом удовлетворяет принцип ультразвуковой дегазации жидкости, с успехом применяемый в нефтехимической промышленности [4-6].

Настоящая работа посвящена начальному этапу экспериментальных исследований и отработке перспективных устройств по снижению интенсивности коксоотложений методом ультразвуковой дегазации для дальнейшей реализации хладоресурса углеводородных топлив с целью повышения ресурса работы обогреваемых топливных систем.

Основу метода ультразвуковой дегазации жидкости составляют два основных устройства: генератор пузырьков растворенного газа и сепаратор этих пузырьков выделений. На данном этапе работы исследовались возможности использования в качестве основы системы дегазации ультразвукового генератора. Этот генератор посредством подвода энергии к объему жидкости в виде ультразвуковых колебаний мембраны образует пузырьки растворенного газа, всплывающие на поверхность жидкости. В

работе использовался ультразвуковой лабораторный проточный генератор ультразвуковой частоты (ГУЗЧ) УЗАП-0,2/22-ОП, разработанный для водной среды, с паспортной частотой ультразвуковых колебаний 22 1.65 кГц и мощностью 200 Вт при максимальном расходе воды 1.0 л/мин ( $\approx 13.0$  г/с для керосина РТ).

На предварительном этапе исследований задача состояла в оценке принципиальной возможности генерации пузырьков растворенного воздуха (кислорода воздуха) с визуализацией процесса их образования и изменений параметров потока керосина (расход, давление, температура) при подводе акустической энергии. С этой целью создана экспериментальная установка (см. рисунок 4) для испытаний с протоком и без протока керосина через ГУЗЧ.

Объект испытаний - ГУЗЧ, система подачи керосина - вытеснительная с наддувом топливного бака промышленным воздухом. В испытаниях предусмотрена регулировка расхода и давления керосина, который задается посредством кранов точной настройки, а также мощности генератора ультразвукового воздействия, задаваемого блоком управления ГУЗЧ.

В испытаниях с протоком керосин из расходного бака под давлением, регулируемым краном поз.2, поступает в расходную магистраль. Пройдя топливный фильтр тонкой очистки поз.4, регулировочный кран поз.5, расходомер поз.6 и узел измерения температуры и давления поз.7 он поступает в проточный ГУЗЧ поз.8, где подвергается УЗ воздействию. К верхней части ГУЗЧ присоединен запирающий кран поз.5 и стеклянная трубка поз.9, предназначенные для визуализации состояния керосина при незначительном избыточном давлении. Затем керосин проходит выходной узел измерения температуры и давления поз.7, регулировочный кран поз.5 и далее поступает в сливной бак.

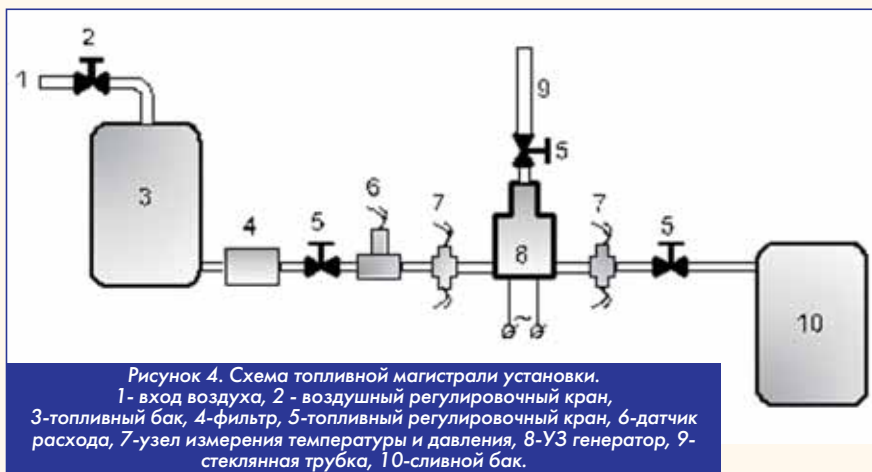


Рисунок 4. Схема топливной магистрали установки. 1 - вход воздуха, 2 - воздушный регулировочный кран, 3 - топливный бак, 4 - фильтр, 5 - топливный регулировочный кран, 6 - датчик расхода, 7 - узел измерения температуры и давления, 8 - ГУЗЧ, 9 - стеклянная трубка, 10 - сливной бак.

В испытаниях с протоком керосин из расходного бака под давлением, регулируемым краном поз.2, поступает в расходную магистраль. Пройдя топливный фильтр тонкой очистки поз.4, регулировочный кран поз.5, расходомер поз.6 и узел измерения температуры и давления поз.7 он поступает в проточный ГУЗЧ поз.8, где подвергается УЗ воздействию. К верхней части ГУЗЧ присоединен запирающий кран поз.5 и стеклянная трубка поз.9, предназначенные для визуализации состояния керосина при незначительном избыточном давлении. Затем керосин проходит выходной узел измерения температуры и давления поз.7, регулировочный кран поз.5 и далее поступает в сливной бак.

В испытаниях измерялись расход керосина в диапазоне 3.0-10.0 мл/с (датчик ТПР-1-1-3), давление и температура керосина на входе и выходе из системы дегазации не более 2 атм и 50°C (датчик ADZ и термопары ТХК), концентрация растворенного кислорода. Погрешность измерений по давлению не более 0.3%, по температуре - 0.5%,

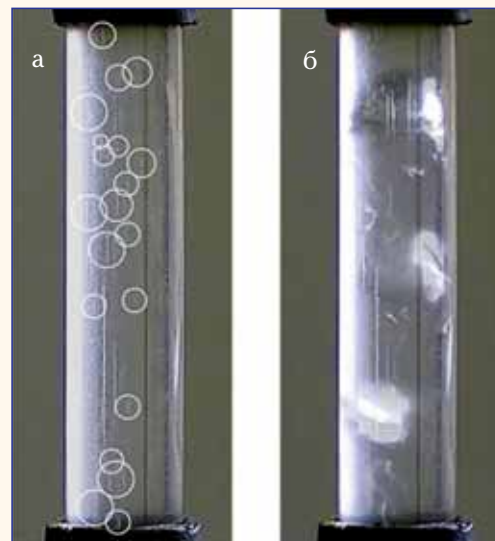


Рис. 5. Фотографии пузырьков растворенного газа (воздуха), образующихся в замкнутом объеме керосина при включенном ГУЗЧ, а - треки мелких пузырьков (обведены кружками), б - крупные газовые конгломераты

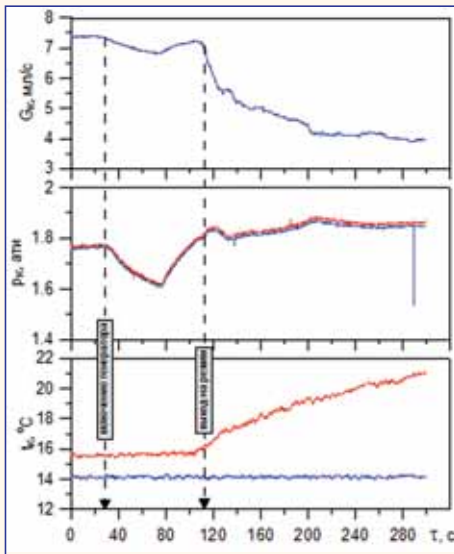


Рис. 6. - Пример изменения параметров топлива по времени при работе ультразвукового дегазатора (опыт №3). Синяя кривая - вход,

растворенного газа при его включении в непроточном режиме работы при атмосферном давлении. Видно, что при включении ГУЗЧ начинается активный процесс образования мелких пузырьков (рисунок 5а), поднимающихся к выходу из стеклянной трубки, а с течением времени, накапливающиеся все в большем количестве мелкие пузырьки формируют крупные образования - газовые конгломераты (рисунок 5б). Через некоторое время (очевидно зависящее от объема жидкости) газообразование практически прекращается.

Еще одним показателем, правда косвенным, активной генерации пузырьков растворенного газа являются данные измерений гидравлических параметров керосина в опытах с протоком керосина через ГУЗЧ (рисунок 6). Так, при включении ГУЗЧ и выходе его на рабочий режим работы в опытах наблюдалось значительное (до двукратного) снижение расхода керосина в проточной магистрали. Например, перед включением ГУЗЧ посредством регулировочных кранов был установлен расхода керосина  $G_k \approx 7.4$  мл/с при избыточном давлении  $P_k \approx 1.78$  ати с температурой на выходе из бака  $t_k \approx 14.2^\circ\text{C}$  (см. рис. 6).

При включении ГУЗЧ в течение 30-50 с самонастройки генератора наблюдаются заметные нестационарные флуктуации измеряемых параметров. Далее, по установлению рабочего режима генератора происходит значительное снижение расхода керосина до  $G_k \approx 3.9$  мл/с, с незначительным ростом общего давления и соответствующим повышением температуры до  $t_k \approx 20.8$  С на рассматриваемом интервале времени. Это снижение расхода обусловлено появлением двухфазной среды с газовыми пузырьками, препятствующей прохождению жидкого керосина ("запиранием") в наиболее узкой части топливной магистрали - выходного игольчатого крана. Отличие показаний температур керосина ( $\Delta t_k \approx 1.5^\circ\text{C}$ ) на входе и выходе из магистрали близко к штатной погрешности ХК термомпар.

Еще одним эффектом, обнаруженным в процессе исследования, является изменение химического состава керосина, подвергнутого УЗ воздействию в непроточных опытах. На рисунке 7 показаны фотографии непроточного контрольного объема керосина ( $\approx 270$  мл) до и после УЗ воздействия. Видно, что при УЗ воздействии после 15-20 секунд началось и после  $\approx 3-4$  мин практически завершилось полностью заметное помутнение керосина, по-видимому, вследствие образования коллоидного раствора взвеси углеводородных соединений. Это свидетельствует об изменении состояния обрабатываемой среды при УЗ воздействии. Возможно, что возникающие физико-химические явления при распространении акустических волн вызваны процессами кавитационной деформации пузырьков.

В работе [8] со ссылками на многочисленные работы проведен подробный анализ физико-химических аспектов УЗ воздействия на жидкие углеводородные среды. В ней отмечается, что

по расходу - 1%.

Отметим, что равновесное содержание растворенного кислорода в авиационном керосине РТ, определенное при нормальных условиях, типичных для условий опытов, было определено на уровне  $74.0 \pm 3.7$  мг/дм<sup>3</sup>. Это значение хорошо совпадает с данными [2]. Исследование выполнено в лаборатории "ЭкоЗонд" при МГУ им. М.В. Ломоносова методом адсорбционной пиролитической хроматографии.

На представленных фотографиях (рисунок 5) показан пример процесса генерации пузырьков



Рис. 7. Изменение структуры керосина после УЗ воздействия.

развитие химических реакций в ультразвуковом поле тесно связано с возникновением явления кавитации, которое представляет собой процесс образования под действием ультразвуковых волн в жидкой среде пузырьков и их исчезновения, сопровождаемое гидравлическими интенсивными ударами. Важной особенностью кавитации является локальное концентрирование энергии ультразвукового поля в малых объемах, за счет чего создаются высокие плотности энергии. При прохождении ультразвуковых колебаний через жидкости давление изменяет знак с удвоенной частотой создаваемого поля, поэтому размеры таких пузырьков очень малы ( $\sim 10^{-5} - 10^{-1}$  см) [8]. Воздействие акустической энергии поля на углеводородные среды приводит к снижению их вязкости и молекулярной массы в результате фрагментации цепей на активные частицы. Отмечается, что в результате применения кавитационного метода существенно подавляются процессы коксообразования, интенсифицируются процессы деструкции и значительно снижается температура крекинга.

В частности, в момент схлопывания кавитационного пузырька в микрообъеме развиваются высокие температуры, достигающие  $10000^\circ\text{C}$  и больше и высокое давление до десятков тысяч атмосфер [9, 10], что и приводит к различным химическим реакциям, основными из которых являются окисление, восстановление, распад и синтез органических и неорганических веществ, полимеризация и деполимеризация, внутримолекулярные перегруппировки и др. Так, в [10] приведены различные подходы к моделированию динамики одиночного пузыря в жидкости. В частности давление газовой смеси в пузырьке  $P$  складывается из давлений растворенного газа и паров жидкости  $P_g$ , которое принимают постоянным и равным давлению насыщенных паров жидкости при данной температуре (с давлением среды  $P_0$  с коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma$ ). Давление газа зависит от вида термодинамического процесса, принятого в конкретной модели движения пузырька исходного радиуса  $R_0$ . Процесс сжатия обычно считается адиабатическим с показателем адиабаты  $k$  и это находит хорошее совпадение с результатами экспериментов.

В этом случае, следуя [10], изменение давления и температуры в пузыре можно представить соотношениями:

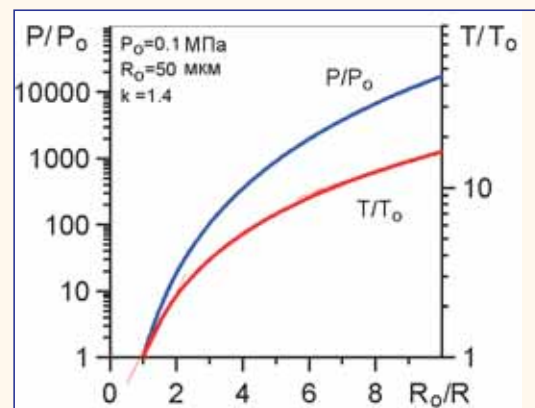


Рис. 8. Изменение относительного давления и температуры в одиночном пузырьке в зависимости от его относительного радиуса

$$P = P_s + (P_0 + (2\sigma/R) + (R_0/R)^{3k}) \text{ и } T/T_0 = (P/P_0)^{(k-1)/k}$$

На основании этих зависимостей на рисунке 8 показано изменение давления и температуры в пузырьке растворенного в керосине РТ газа при характерном уменьшении его радиуса в процессе деформации - значительное повышение уровня давления и температуры в при уменьшении радиуса пузырька.

Таким образом, в результате проведенных испытаний показана принципиальная возможность применения процесса ультразвуковой генерации пузырьков растворенного воздуха (кислорода воздуха) для дальнейшего их сепарирования. Применение эффективных сепарирующих устройств позволит отделить образовавшиеся пузырьки газа от жидкости и удалить их из топливной магистрали. Выявленные эффекты длительного ультразвукового воздействия на состав керосина в замкнутом объеме требуют специального рассмотрения с анализом последствий работы ГУЗЧ в проточной системе дегазации. **□**

### Литература

1. Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М., Сапгир Г.Б. Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях. Казань, 1999г, 285с
2. Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П., Федоров Е.П. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив. Справочник, М., Химия, 1985, 240с
3. Шлякотин В.Е., Шихман Ю.М., Митрофанов К.Е. и др. Экспе-

риментальные исследования коксоотложения в модели трубчатого теплообменника при нагреве керосина в условиях жидкофазного окисления. Труды ЦИАМ №1343, М; Торус пресс, 2010

4. Жежера Н. И. Размеры и движение пузырьков газа при дегазации нефти в акустическом деаэраторе. Альманах современной науки и образования Тамбов, изд. "Грамота", 2012. № 8 (63). С. 50-53. ISSN 1993-5552

5. Жежера Н. И. Сепарационная установка газ-нефть как объект автоматического управления по давлению газа // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2012. № 5. С. 58-64.

6. Жежера Н. И., Самойлов Н. Г. Теоретические положения к устройству измерения динамической составляющей расхода газа // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2012. № 4 (39). С. 47-50.

7. Коган В.Б., Фридман В.М., Кафаров В.В. Справочник по растворимости, Том I. Бинарные системы, книга первая. Издательство академии наук СССР, Москва-Ленинград, 1961, 961с.

8. Ануфриев Р. В. Влияние ультразвуковой обработки на структурно-механические свойства и состав нефтяных дисперсных систем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук. Томск - 2017.

9. Барамбойм Н.К. Механохимия высокомолекулярных соединений. М., Химия, 1971. 264 с

10. Смородов Е.А., Галиахметов Р.Н., Ильгамов М.А. Физика и химия кавитации. М., Наука, 2008, 226с.

Связь с авторами: [ev@ciam.ru](mailto:ev@ciam.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ

**В** конце июня 2017 года компания Jaguar сообщила о пополнении семейства технологичных и экономичных двигателей Ingenium новым 300-сильным бензиновым мотором для Jaguar XE, XF и F-PACE. Крутящий момент этого 2,0-литрового четырехцилиндрового агрегата составляет 400 Нм и обеспечивает высокую динамику при ускорении.

Новый мотор позволяет разогнать Jaguar F-PACE с 0 до 100 км/ч за 6,0 секунды при расходе топлива 7,7 л/100 км. Для бизнес-седана XF с полным приводом этот показатель составляет 5,8 секунды, выбросы CO<sub>2</sub> - 163 г/км, а расход топлива всего 7,2 л/100 км. Таким образом, традиционная динамика Jaguar сочетается с замечательной экономичностью.

В случае со спортивным седаном XE разгон от 0 до 100 км/ч занимает всего лишь 5,5 секунды (для версии с полным приводом), а расход топлива - 6,9 л/100 км при выбросах CO<sub>2</sub> в размере 157 г/км.

По заявлению Ника Роджерса (Nick Rogers), исполнительного директора по разработке продуктов Jaguar Land Rover, компания продолжает расширять линейку двигателей Ingenium, предлагая покупателям еще больше возможностей для выбора. Новый бензиновый двигатель мощностью 300 л.с. обеспечивает впечатляющую динамику и отличную топливную экономичность благодаря современной технологии выхлопа и передовому газораспределительному механизму. Этот экологичный и эффективный двигатель отлично дополняет легкий алюминиевый кузов XE, XF и F-PACE.

Новый четырехцилиндровый двигатель P300 оснащается всеми новейшими технологиями Jaguar Land Rover, включая турбину twin-scroll с керамическими шарикоподшипниками, снижающими трение, и высокопроизводительным компрессорным колесом для улучшенной динамики. Двигатель производится в специализированном производственном центре в Уольверхэмптоне, Великобритания.

Вместе с технологичной автоматической 8-ступенчатой трансмиссией ZF новый силовой агрегат обеспечивает невероятно плавное ускорение и незаметные переключения передач.

Ранее в этом году была представлена линейка бензиновых 2,0-литровых двигателей Ingenium мощностью 200 л.с. и 250 л.с.

Кроме того, дебютировал 2,0-литровый турбодизель мощностью 240 л.с.

Дальнейшие обновления для 2018 года включают такие технологии, как управление приводом двери багажника жестами (Gesture Boot Lid) для XF и XE, а также технологию Configurable Dynamics, которая позволяет водителям персонализировать настройки трансмиссии и рулевого управления.

Все три модели оснащаются современными средствами активной безопасности, такими как система определения дорожной ситуации по ходу движения автомобиля Forward Traffic Detection и система Forward Vehicle Guidance, которая помогает водителю при совершении маневров на низкой скорости, показывая изменение курса автомобиля в зависимости от поворотов руля. **□**

