

Сведения о выполненных работах и полученных научных результатах
в период с 01.07.2023 г. по 30.06.2024 г.

по проекту **«Влияние поверхностно-активных веществ на дисперсность капель при распылении жидких топлив форсунками»**,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 22-79-00092

Руководитель: Перфильева Ксения Григорьевна, канд. физ.-мат. наук

Во второй год проекта получен ряд новых научных результатов по влиянию добавок на дисперсные характеристики и пространственное распределение концентрации капель керосина в факеле распыла эжекционной форсунки двух типов (с газовым трактом в форме конфузора и с тангенциальной подачей газа). Проведен анализ возможности моделирования характеристик факела распыла топливных компонентов на модельных жидкостях (спирт, керосин). Представлено обоснование выбора авиационного керосина ТС-1 в качестве модельной жидкости и анализ его физических характеристик. Проведен аналитический обзор научной литературы по способам повышения эффективности работы двигательных установок за счет введения в топливо различных добавок, таких как спирты, масла, силиконовые жидкости и поверхностно-активные вещества. По результатам проведенного исследования были выбраны наиболее эффективные типы добавок в топливо для достижения поставленных в проекте целей. Представлено обоснование выбора полиэтилсилоксановой (ПЭС-4), полидиметилсилоксановой «DIMETHICONE ZZSIL DM 60000» (ПДМС) жидкостей и силиконового ПАВ RO-408 (CAS: 67674-67-3) в качестве добавок в топливо и анализ их физических характеристик. Проведен цикл экспериментальных исследований по влиянию добавок на коэффициенты поверхностного натяжения и динамической вязкости керосина. Показано, что при введении в керосин добавок в количестве не более 1 мас.% происходит монотонное снижение коэффициента поверхностного натяжения с увеличением концентрации добавок в диапазоне от 28.89 до 25.51 мН/м. Также показано, что введение в керосин ПЭС-4 и силиконового ПАВ RO-408 в количестве 1 мас.% не оказывает влияние на коэффициент динамической вязкости раствора, однако введение ПДМС в количестве 1 мас.% в керосин приводит к повышению данного значения на 23 %. Проведена модификация экспериментальных установок для повышения безопасности проведения экспериментальных исследований по влиянию коэффициента поверхностного натяжения на структуру и дисперсные характеристики факела распыла эжекционной форсунки.

Получены новые результаты экспериментального исследования влияния коэффициента поверхностного натяжения керосина на структуру и размер капель в факеле распыла эжекционной форсунки. Экспериментально показано, что при введении добавок (ПЭС-4, ПДМС, силиконовый ПАВ) в керосин происходит снижение его коэффициента поверхностного натяжения, что приводит к изменению дифференциальной функции счетного распределения, а также дифференциальной и

интегральной функций массового распределения капель растворов керосина в факеле распыла. Повышение концентрации добавок в керосине приводит к увеличению сдвига кривых. Показано, что все диаметры капель снижаются с ростом концентрации добавок в керосине вне зависимости от его типа. При распыливании раствора керосин-ПЭС-4 с концентрацией 1 мас.% ($\sigma = 27.85$ мН/м) максимальное снижение всех диаметров капель составляет ~10 % для форсунки с газовым трактом в форме конфузора и ~12 % для форсунки с тангенциальной подачей газа. При распыливании раствора керосин-силиконовый ПАВ с концентрацией 1 мас. % ($\sigma = 26.85$ мН/м) максимальное снижение диаметров капель составляет ~13 % для форсунки с газовым трактом в форме конфузора и ~12% для форсунки с тангенциальной подачей газа. При распыливании раствора керосин-ПДМС при концентрации 1 мас.% ($\sigma = 25.51$ мН/м) максимальное снижение всех диаметров капель составляет ~23 % для форсунки с газовым трактом в форме конфузора и ~21 % для форсунки с тангенциальной подачей газа. Наиболее мелкодисперсный факел распыла был получен при распыливании раствора керосин-ПДМС при значении коэффициента поверхностного натяжения 25.51 мН/м для форсунки с газовым трактом в форме конфузора. Получены уточненные зависимости радиального распределения концентрации капель растворов керосина в факеле распыла эжекционной форсунки в зависимости от концентрации добавок. Показано, что при введении добавок в керосин радиальное распределение концентрации капель имеет монотонный характер с максимумом на оси симметрии факела распыла, как и для дистиллированной воды с добавками ПАВ. Снижение коэффициента поверхностного натяжения приводит к более равномерному распределению концентрации капель в факеле распыла. Максимальное изменение зависимости получено при введении силиконового ПАВ в количестве 1 мас.% в керосин и при распыливании раствора эжекционной форсункой с тангенциальной подачей газа. При введении ПДМС в керосин в количестве 1 мас.% коэффициента поверхностного натяжения раствора снижается сильнее, чем при введении силиконового ПАВ, однако на структуру факела распыла максимальное влияние оказывает силиконовый ПАВ. Данный эффект возможно обусловлен тем, что при введении ПДМС и ПЭС-4 в керосин в итоге получаются смеси двух жидкостей, следовательно, в процессе растворения их распределение по объему может являться не равномерным, а при введении силиконового ПАВ в керосин, вещество сорбируется на границе раздела фаз керосин-воздух и снижает тем самым поверхностное натяжение. Получены критериальные уравнения для расчета характеристик факела распыла эжекционной форсунки. При введении добавок в керосин происходит снижение коэффициента поверхностного натяжения, что приводит к уменьшению диаметров капель на (10÷23) %. Отметим, что, несмотря на незначительное снижение коэффициента поверхностного натяжения, значения чисел Бонда и Вебера снижаются (за счет более существенного снижения размеров капель по сравнению с коэффициентом поверхностного натяжения).

Максимальное снижение размера капель в факеле распыла было получено за счет добавки ПДМС в керосин, однако максимальное изменение зависимости распределения концентрации капель в факеле распыла было получено за счет введения силиконового ПАВ. Также при добавлении ПДМС в керосин при

максимальной концентрации 1 мас.% коэффициент динамической вязкости повышается на 23 %. Поэтому возможность применения ПДМС в качестве добавки в топливо является не однозначной. Также из-за повышения коэффициента динамической вязкости при введении ПДМС в керосин необходимо проводить изменение конструкции двигателя, в частности, заменить систему впрыска топлива для достижения необходимых рабочих параметров в камере сгорания двигателя. Из всех предложенных в проекте добавок в топливо наиболее перспективной является силиконовый ПАВ, который отвечает всем заявленным в проекте требованиям.

Результаты сравнительного анализа показали, что выбранная в рамках настоящего проекта добавка (силиконовый ПАВ) для топлива является наиболее перспективной по сравнению с маслами, силиконовыми жидкостями, фтор-ПАВ и эмульсиями типа «вода+ПАВ+топливо». Показано, что результаты проведенных экспериментальных исследований в пересекающихся диапазонах параметров для схожих композиций ПАВ не противоречат опубликованным данным в литературе. Результаты исследований в рамках данного проекта позволили получить более детальную информацию о физических процессах диспергирования и смешения топливных компонентов двигательных установок. В частности, впервые получены и проанализированы данные по влиянию типа и концентрации ПАВ на функцию распределения капель по размерам для топливных компонентов с близкими типичными компонентами жидких топлив по физическим свойствам. Впервые получены закономерности по диспергированию и по структуре факела распыла для форсунки эжекционного типа.

Сформулированы рекомендации по выбору типа и концентрации добавок в топливо для повышения эффективности процессов смесеобразования и горения жидких топлив в двигательных установках. Наиболее перспективной добавкой в топливо является силиконовый ПАВ, за счет наличия высокой поверхностной активности, которая приводит к снижению поверхностного натяжения на границе раздела фаз керосин-воздух, тем самым улучшает смесеобразование в двигателе и не оказывает значительного влияния на другие физико-химические характеристики топливной смеси, имеет температуру кипения равную температуре кипения керосина, может значительно понизить степень загрязнения деталей двигателя за счет моющих свойств и препятствует образованию коррозии в топливной системе. Силиконовый ПАВ RO-408 способствует увеличению энергетических характеристик топлива за счет повышения общей поверхности взаимодействия топлива с окислителем, что приводит к повышению эксплуатационных свойств двигателя. Данный тип ПАВ в качестве присадки в топливо является экологичной, легкой в применении и не дорогой альтернативой традиционным присадкам на основе свинца и алюминия.

Возможность практического использования результатов проекта:

В настоящее время существует большое количество технических систем, работающих на углеводородных топливах – двигатели внутреннего сгорания, жидкостные и газотурбинные ракетные двигатели и т.д. Для повышения эффективности работы этих систем необходимо снижение дисперсного состава

капель в факеле распыла. Одним из возможных и менее затратных способов снижения размера капель является регулирование коэффициента поверхностного натяжения диспергируемой топливной смеси, за счет введения поверхностно-активные веществ (ПАВ). Снижение коэффициента поверхностного натяжения способствует увеличению энергетических характеристик топливной смеси за счет повышения общей поверхности взаимодействия топлива с окислителем. В результате выполненного проекта представлена крайне перспективная добавка в топливо (силиконовый ПАВ RO-408), которая приводит к значительному снижению поверхностного натяжения топливной смеси, при этом не оказывает значительного влияния на другие физико-химические характеристики раствора, может значительно понизить степень загрязнения деталей двигателя за счет моющих свойств и препятствует образованию коррозии в топливной системе. Применение силиконового ПАВ (RO-408) в качестве добавки в топливную смесь для двигателей внутреннего сгорания, жидкостных и газотурбинных ракетных двигателей является экологичной, легкой в применении и не дорогой альтернативой традиционным присадкам.

Наряду с этим результаты проекта могут быть использованы в ряде процессов и технологий, имеющих важное практическое значение, в частности, для повышения эффективности технологии авиационного тушения пожара с борта летательного аппарата за счет повышения дисперсности капель хладагента введением в него ПАВ, в процессах и аппаратах химической технологии с жидко-капельными компонентами, распыление химикатов и полив растений в сельском хозяйстве, в решении экологических проблем, связанных с осаждением токсичных жидкостей при отделении ступеней ракет-носителей с ЖРД, при аварийном сливе авиационного топлива и т.д.