

**ХІММОТОЛОГІЯ. АВІАЦІЙНА НАЗЕМНА ТЕХНІКА.
БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ АЕРОПОРТІВ**

УДК 629.7.063:629.7.083.02

А.И. Козаченко П.Ф. Максютинский

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТОПЛИВ С ПОВЫШЕННОЙ ТНК И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ТАКИХ ТОПЛИВАХ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Целью исследования является определение вязкостно-температурных характеристик топлива с повышенной ТНК и работоспособности насосных агрегатов и топливных фильтров при моделировании реальных температурных и гидродинамических режимов в ожидаемых условиях эксплуатации топливной системы самолета.

Проведенными экспериментальными исследованиями установлена эффективность гидромеханического действия на углеводородное топливо в процессе охлаждения, которая проявляется в том, что при перемешивании топлива насосными агрегатами резкое возрастание вязкости происходит при температурах на 6...8°С ниже, чем при охлаждении в статическом состоянии топлива.

В эксплуатационной практике применения топлив с повышенной температурой начала кристаллизации (ТНК) действует единая ограничительная норма: температура топлива типа Jet A и его смесей с другими сортами топлива в баках воздушных судов в ожидаемых условиях эксплуатации не должна понижаться ниже минус 35°С.

Указанное ограничение существенно усложняет и удорожает эксплуатацию ВС на широко применяемых топливах с повышенной ТНК.

Есть основания, однако, утверждать, что установленную предельно допустимую температуру топлива в баках ВС (минус 35°С) неправомерно принимать в качестве единой нормы применения топлив с повышенной ТНК и их смесей с другими топливами.

Для топлива типа Jet A с ТНК минус 40°С предельно допустимая температура в баках ВС минус 35°С является достаточно обоснованной, так как существует реальная возможность локального охлаждения в пристенных зонах и непроточных топливопроводах до температуры ниже контролируемой. Для топлив с ТНК минус 50°С ограничение их применения при температуре в баках минус 35°С нецелесообразно по следующим соображениям.

Интенсивность охлаждения топлива в баках-кессонах современных ВС в большой степени зависит от перепада температуры топлива в баках и набегающего потока. В диапазоне температур топлива в баках минус 30... минус 40°С интенсивность охлаждения в зависимости от внешних температурных условий и температуры заправляемого топлива находится в пределах 5...2°С в час; при понижении температуры в баках ниже минус 40°С интенсивность охлаждения составляет 2,5...1,5°С в час [1].

Таким образом, после достижения температуры топлива в баках минус 35°С самолет может продолжать полет на топливе с ТНК минус 50°С еще 2...5 ч без возникновения предпосылок к отказам топливной системы.

Значительный резерв сохранения работоспособности топливной системы ВС заключается в использовании гидромеханического воздействия на топливо в процессе его охлаждения. Экспериментальными исследованиями работоспособности топливных систем самолетов Ту-204, Ту-334, Ан-70 и других на топливах с повышенной ТНК обнаружено влияние непрерывного принудительного перемешивания топлива в баках на его прокачиваемость вблизи температуры кристаллизации топлива. Этот эффект представляет научный и практический интерес, так как в процессе охлаждения при прохождении ТНК топливо становится неньютоновской жидкостью, что должно оказывать влияние на гидравлические характеристики топливной системы и ее агрегатов.

В этой связи представляют интерес исследования различных способов и режимов гидромеханического воздействия на топливо, в том числе исследование вязкостно-температурных характеристик топлив с повышенной ТНК, характеристик насосных агрегатов, прокачиваемости топливопроводов, фильтруемости, что позволяет выявить возможные резервы обеспечения работоспособности топливной системы ВС на топливах с повышенной ТНК.

На экспериментальной установке (рис.1), обеспечивающей возможность моделирования реальных гидродинамических и низкотемпературных условий исследовали:

- вязкостно-температурные характеристики топлива Jet A при охлаждении в статике до температуры ниже ТНК;
- работоспособность системы перекачки струйным насосом в процессе охлаждения топлива Jet A до температуры ниже ТНК;
- работоспособность системы перекачки центробежным насосом в процессе охлаждения топлива Jet A до температуры ниже ТНК;
- фильтруемость топлива Jet A в процессе охлаждения до температуры, близкой к ТНК;
- температуру начала кристаллизации и температуру застывания различных сортов топлив и их смесей.

Для этой цели использовали товарное топливо Jet A без ПВК жидкости, слитое из бака самолета Ил-62, заправленного в аэропорту США. Экспериментальные данные по определению ТНК и температуры застывания топлива Jet A и его смесей с другими сортами топлива, полученные при охлаждении в статическом состоянии (табл.1), показывают, что ТНК, согласно полученным данным, топлива Jet A равна минус 48°С. Температурный интервал от ТНК до полной потери жидкотекучести этого топлива составляет 3...4°С.

Следует отметить, что наличие в охлаждаемом топливе Jet A эмульсионной воды в реально возможных количествах практически не влияет на значение ТНК, однако при этом существенно сокращается температурный интервал от ТНК до температуры застывания. Это объясняется тем, что при температурах, близких к ТНК, дисперсная водная фаза в топливе находится в кристаллическом состоянии. Взвешенные в топливе кристаллы льда служат центрами кристаллизации высокозамерзающих углеводов, вследствие чего ускоряется процесс застывания топлива.

При использовании смеси топлива Jet A с топливом ТС-1, у которого ТНК составляет около минус 60°С, температура начала кристаллизации смеси изменяется аддитивно.

Так, для смеси с равными долями указанных топлив ТНК достигла минус 53°С, однако при этом температурный интервал от ТНК до температуры застывания не увеличивается. Наличие эмульсионной воды в этой смеси также практически не влияет на значения ТНК, но несколько ускоряет процесс застывания.

Понижение температуры начала кристаллизации топлив с повышенной ТНК в смеси с топливами с более низкой ТНК объясняется следующим. Топлива с повышенной ТНК исследуемое топливо Jet A отличаются повышенным содержанием высокозамерзающих индивидуальных углеводородов, в том числе нормальных парафинов. Температура начала кристаллизации таких топлив – это температура, при которой достигается предельная растворимость высокозамерзающих углеводородов в смеси, что вызывает их выделение и раствора и кристаллизацию.

Таблица 1

Экспериментальные данные по определению ТНК и температуры застывания топлива

Но- мер образ- ца	Сорт и состав смесей топлива	Добавление высокозамерза- ющих углеводородов	Содержание эмульсионной воды в топли- ве, % масс	Температура начала крис- таллизации, °С	Темпера- тура зас- тывания, °С
1	Jet A	–	–	- 47,5	- 51
2	«	–	–	- 48	- 51
3	«	–	–	- 48	- 52
4	«	–	0,2	- 48	- 49
5	«	–	0,2	- 48	- 49
6	Смесь: Jet A (50%), ТС-1 (50%)	–	–	- 53	- 56
7	То же	–	–	- 53	- 56
8	Смесь: Jet A (50%), ТС-1 (50%)	–	0,2	- 53	- 55
9 10	Jet A с добавлением индивидуальных углеводородов	6,7% нормальных парафинов $C_{15}H_{32}$ и $C_{16}H_{34}$ в равных долях	–	- 32	- 33
11	Смесь: Jet A (50%), Образец 9 (50%)	В смеси повышено содержание парафинов	–	- 39,5	- 41,5
12	Смесь: Jet A (50%), Образец 9 (35%)	То же	–	- 42,5	- 45,5

В смеси топлива Jet A и ТС-1 концентрация нормальных парафинов ниже, чем в чистом топливе Jet A, поэтому предельная их растворимость в смеси достигается при более низких температурах. По достижении же такой температуры интенсивность застывания смеси Jet A и ТС-1 остается практически такой же, как и для чистого топлива Jet A.

Добавление в топливо Jet A нормальных парафинов $C_{15}H_{32}$ и $C_{16}H_{34}$ в равных долях в количестве 6,7% масс дает повышение ТНК на $16^{\circ}C$, при этом, разница между ТНК и температурой застывания сокращается до $1^{\circ}C$. При уменьшении добавки нормальных парафинов в два и в три раза ТНК понижается соответственно на $7,5...10,5^{\circ}C$, а интервал

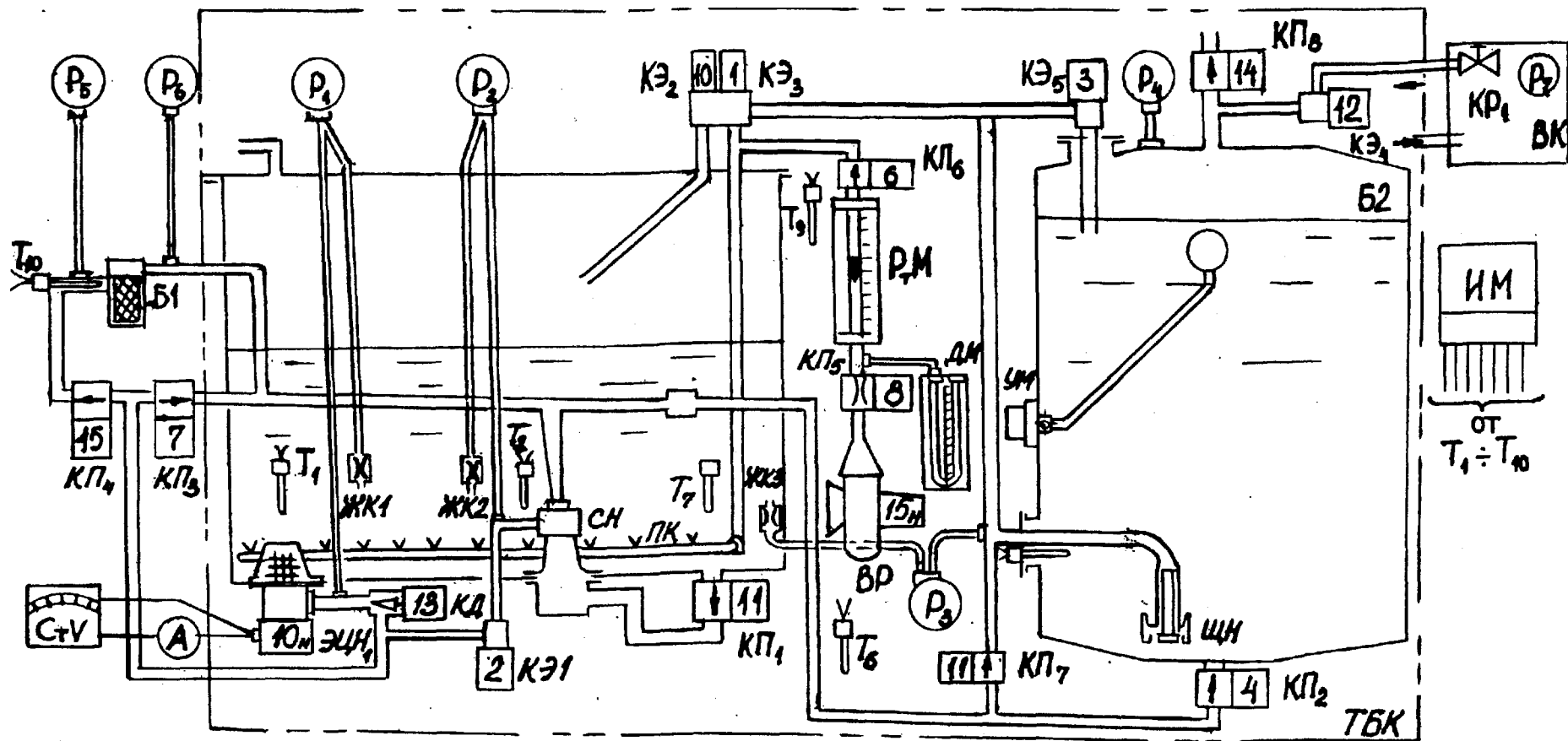


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

ТБК – термобарокамера КТВВ-8000; Б1, Б2 – расходный и мерный баки; ЭЦН-1 – подкачивающий насос типа ЭЦН-19;
 СН – струйный насос СН6; P1 ... P7 – манометры образцовые; КП1 ... КП7 – перекрывающие краны электродистанционного управления;
 КД – дроссельный кран; КЭ1 ... КЭ5 – электромагнитные клапаны; ЩН – шелевой насадок; ТФ – топливный фильтр;
 ПК – перфоколлекторы; ВК – воздушный компрессор; ВР – вентилятор; РМ – ротаметр; ДМ – дифманометр;
 ЖК2 ... ЖК3 – жиклеры проливки манометров; А – амперметр; Т1 ... Т10 – датчики температуры типа П1;
 ИМ – измерительный мост КСМ-4

температур между ТНК и температурой застывания несколько увеличивается. Этим подтверждается описанный выше механизм кристаллизации углеводородных топлив.

Низкотемпературные ограничения применения топлив типа Jet A обусловлены возможными нарушениями гидродинамических характеристик топливной системы вследствие резкого нерасчетного возрастания вязкости топлива при достижении ТНК. Вязкостно-температурная характеристика авиакеросинов описывается уравнением [2]:

$$\lg \lg(v_T + 1) = \frac{A}{T} - B, \quad (1)$$

где v_T – кинематическая вязкость при температуре T , К; A , B – эмпирические коэффициенты, определяемые из этого же уравнения при измеренных двух значениях v_T .

Кинематическая вязкость применяемого в данных исследованиях топлив Jet A, измеренная на капиллярном вискозиметре, составляет:

$$\begin{aligned} \text{при } t_T = 20^\circ\text{C} \quad v_T &= 2 \text{ мм}^2/\text{с}; \\ \text{при } t_T = 2^\circ\text{C} \quad v_T &= 2,8 \text{ мм}^2/\text{с}; \end{aligned}$$

Подстановкой этих значений вязкости в уравнение (1) получены константы A и B для данного образца топлива: $A = 379$; $B = 1,615$.

Таким образом, получена формула для расчета кинематической вязкости исследуемого топлива Jet A₄₈

$$v_T = 10^{10 \left(\frac{379}{T} - 1,615 \right)} - 1. \quad (2)$$

Значения кинематической вязкости, полученные расчетом по формуле (2), приведены в табл.2.

Таблица 2

Расчетные значения кинематической вязкости топлива Jet A

$t_T, ^\circ\text{C}$	20	0	- 10	- 20	- 30	- 40	-48	- 53
$v_T, \text{мм}^2/\text{с};$	2,0	3,0	3,7	4,8	6,6	9,6	14,5	18,1

Кинематическая вязкость, рассчитанная по формуле (2) при температурах топлива ниже ТНК, является кажущейся, т.е. полученной в предположении отсутствия в топливе дисперсной фазы, так как уравнение (1), выражающее вязкостно-температурные характеристики светлых нефтепродуктов, справедливо для ньютоновских жидкостей.

Важной задачей экспериментального исследования работоспособности топливной системы ВС на топливах с повышенной ТНК является определение фактической вязкости топлива в процессе его охлаждения, так как этим параметром определяется его прокачиваемость, т.е. гидравлические характеристики агрегатов и магистралей топливной системы.

Вязкость жидкости является мерой ее внутреннего трения, проявляющегося при движении жидкости. Таким образом, представляется возможным определить вязкость экспериментально путем измерения гидравлического сопротивления канала заданной формы с заданными геометрическими параметрами при заданных или измеренных подаче и перепаде давления. Полученная таким образом вязкость жидкости однозначно характеризует ее прокачиваемость.

Для измерения фактической вязкости топлива Jet A применялся щелевой насадок, конструкция и геометрические параметры которого показаны на рис.2. Применение щелевого вискозиметра для измерений фактической вязкости является предпочтительным, так как в щелевом канале с достаточно малым зазором лучше всего проявляется изменение сил трения, влияющих на прокачиваемость топливопроводов.

Щелевой насадок помещен внутри мерного бака и погружен в топливо. Прокачка топлива при измерении вязкости производится путем вытеснения сжатым воздухом топлива, находящегося в мерном баке. Таким образом, исключается гидромеханическое воздействие на исследуемое топливо, которое могло бы повлиять на фактическое агрегатное его состояние в баке при прохождении ТНК в процессе охлаждения в статическом состоянии.

Определение кинематической вязкости топлива по данным измерений на щелевом вискозиметре производилось на основании формулы Пуазейля, исходя из которой получена расчетная формула для определения кинематической вязкости исследуемого топлива по данным измерений на щелевом насадке:

$$v_T = \frac{\pi D \sigma^3 \Delta p}{12l \rho_T Q}, \quad (3)$$

где D – средний диаметр кольцевой щели; σ – ширина щели (зазор); l – длина щелевого канала; p – измеренный перепад давления на щелевом насадке; ρ_T – плотность исследуемого топлива; Q – заданная установившаяся объемная подача топлива через щелевой насадок.

При расчете вязкости (3) учитывалось температурное изменение плотности исследуемого топлива.

Вязкостно-температурная характеристика топлива Jet A, полученная в процессе его охлаждения в статическом состоянии по описанной выше методике (рис.3), приведена в табл.3.

Таблица 3

Экспериментальные вязкостно-температурные данные топлива Jet A

$t_T, ^\circ\text{C}$	0	-10	-22	-33	-36	-45	-48	-50	-51,5
$v_T, \text{мм}^2/\text{с}$	4,0	4,4	5,0	6,0	7,3	9,1	11,7	15,0	23,5

Некоторое превышение экспериментальных значений вязкости над расчетными при температурах выше -20°C свидетельствует о том, что при низких значениях вязкости течение в щелевом канале не является строго ламинарным.

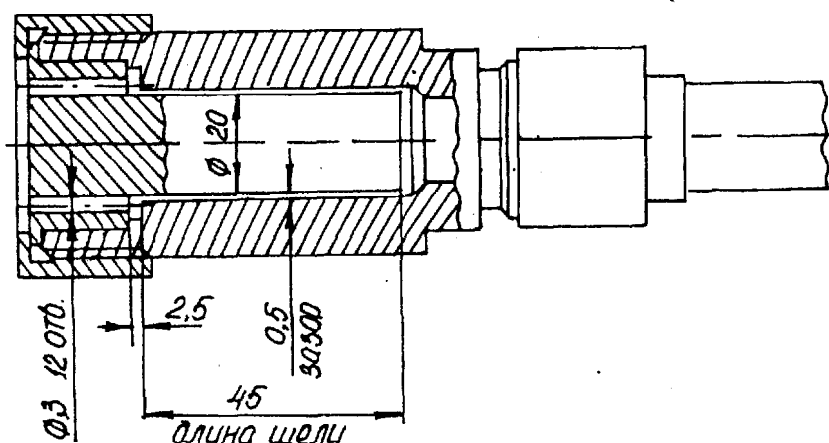


Рис.2. Щелевой насадок для измерения вязкости топлива

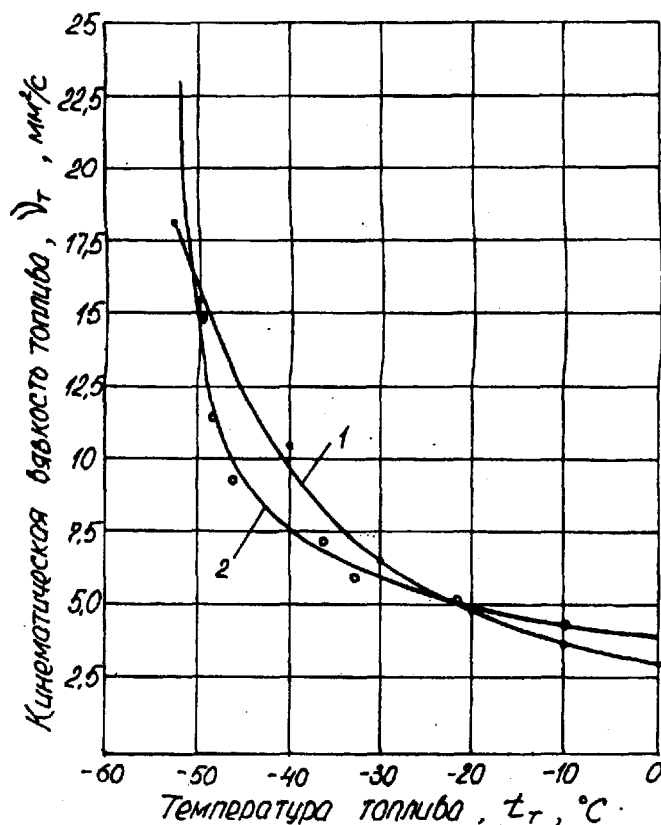


Рис.3. Зависимость кинематической вязкости топлива Jet A₄₈ от температуры:

1 — рассчитанная; 2 — экспериментальная, полученная на щелевом вискозиметре при охлаждении топлива в статическом состоянии

Существенное расхождение экспериментальных и расчетных данных в диапазоне температур от минус 35°С до ТНК очевидно объясняется тем, что константы логарифмической зависимости для исследуемого топлива были определены по двум значениям вязкости, полученным на капиллярном вискозиметре при положительных температурах, что, очевидно, не отражает характера этой зависимости при глубоком охлаждении топлива.

В топливных системах современных ВС применяются многоступенчатая перекачка и подкачка топлива струйными и центробежными насосами: из очередных баков — в предрасходный отсек, из предрасходного — в расходный, из расходного отсека — в двигатель. При этом топливо неоднократно подвергается интенсивному гидромеханическому воздействию насосных агрегатов, турбулизируется в баках и топливопроводах, вследствие чего топливо может сохранять жидкотекучесть при температурах ниже ТНК.

Эффективность перемешивания топлива струйным насосом (СН) в этом аспекте оценивается температурой топлива ниже ТНК, до которой сохраняется работоспособность системы перекачками топлива.

Для получения экспериментальных данных, на основании которых могут быть даны практические рекомендации по применению топлив с повышенной ТНК, необходимо моделировать гидромеханический режим непрерывной перекачки посредством СН в процессе длительного охлаждения.

При выборе режима перекачки СН в качестве критерия принималось соотношение подачи перекачиваемого в расходный отсек топлива на крейсерском (длительном) режиме

полета ВС к емкости расходного бака. Этим критерием и определяется интенсивность перемешивания топлива в баках в реальных топливных системах.

Исследование эффективности гидромеханического воздействия струйного насоса проведены на топливе Jet A с ТНК минус 48°C. Получены вязкостно-температурная характеристика топлива и гидравлические характеристики СН, снятые при непрерывной кольцевой перекачке СН в процессе охлаждения до температур ниже ТНК.

Результаты исследования приведены в табл. 4 и на рис.4 и 5.

Таблица 4

Изменение вязкости топлива Jet A при охлаждении с перемешиванием струйным насосом

$t_T, ^\circ\text{C}$	0	-6	-15	-31	-42	-45	-47	-50	-52	-54	-56	-58
$\nu_T, \text{мм}^2/\text{с}$	3,6	4,0	4,6	5,4	5,9	6,2	6,5	7,2	8,3	10,2	14,3	16,2

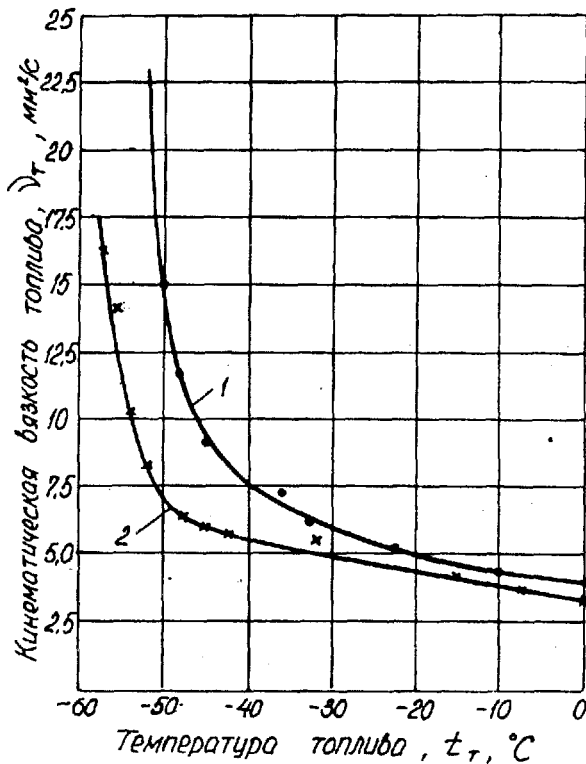


Рис. 4. Зависимости кинематической вязкости топлива Jet A₄₈ от температуры, полученные на щелевом вискозиметре:

- 1 — при охлаждении топлива в статическом состоянии;
2 — при охлаждении с непрерывной кольцевой прокачкой топлива струйным насосом

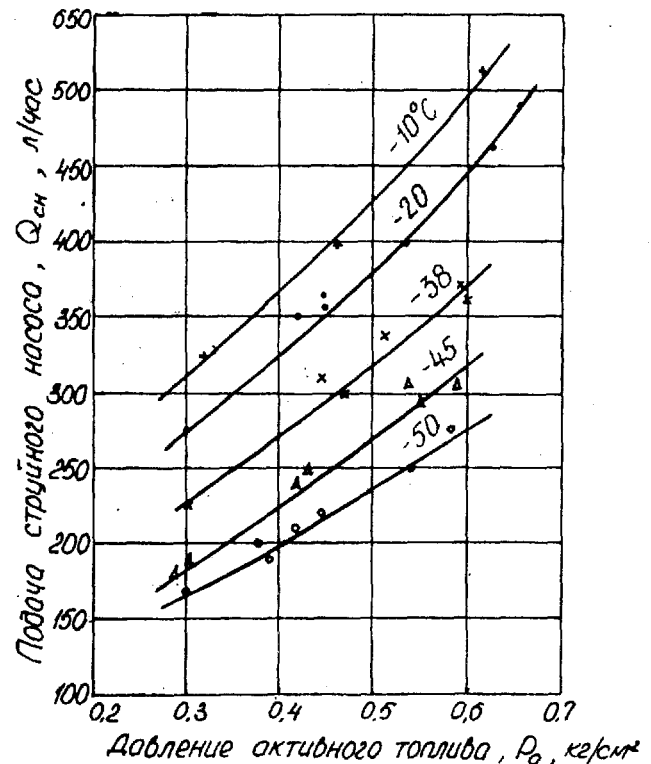


Рис.5. Зависимости подачи струйного насоса $Q_{сн}$ от давления активного топлива P_a , полученные в процессе охлаждения с непрерывной кольцевой прокачкой

Эти данные наглядно подтверждают эффективность непрерывной перекачки топлива СН. Как видно из сопоставления кривых 1 и 2 зависимости $\nu_T(t_T)$, при непрерывном перемешивании топлива СН резкое нарастание вязкости происходит при температурах ниже ТНК и примерно на 8°C более низких, чем при охлаждении в статическом состоянии. Это объясняется следующим.

При достижении ТНК происходит образование кристаллических связей между молекулами избыточных высокозамерзающих углеводородов. При непрерывном гидромеханическом воздействии на топливо в процессе его охлаждения ниже ТНК идут одновременные процессы образования кристаллических связей и их разрушения. Таким образом, в некотором диапазоне температур, начиная с ТНК, устанавливается равновесное агрегатное состояние, когда вновь образующиеся кристаллические связи разрушаются и резкое нарастание вязкости задерживается. Однако с понижением температуры топлива число вновь образующихся кристаллических связей возрастает, а число разрушающихся связей достигает некоторого предельного значения, ограниченного заданной интенсивностью гидромеханического воздействия. При этом в топливе быстро увеличивается содержание кристаллических структур, вследствие чего происходит резкий рост его вязкости.

Установленный эффект от непрерывного перемешивания топлива СН представляет практический интерес. Его использование возможно при условии совершенствования топливных систем ВС путем обеспечения транзитной прокачки топливных баков последней очереди выработки. При этом представляется возможным понижение ограничения температуры топлива в баках на $8...10^{\circ}\text{C}$, что позволит увеличить максимальную продолжительность полетов не менее чем на 2 ч, т.е. практически решить проблему применения топлив с повышенной ТНК без летных ограничений.

Прокачиваемость магистралей перекачки топливных систем ВС определяется, прежде всего, подачей на выходе СН, которая зависит от давления активного топлива и существенно изменяется с понижением температуры (см. рис.5).

В процессе эксперимента режим непрерывной перекачки струйным насосом при исходных температурах подбирался таким, при котором насос СН-6 работал в режиме максимального КПД.

Понижение давления активного топлива на $33...50\%$ от значения, соответствующего режиму максимального КПД, сопровождается уменьшением подачи СН на $28...40\%$ как при температурах выше ТНК, так и при температуре ниже ТНК.

Как видно из низкотемпературных характеристик системы перекачки СН, подача на выходе СН достаточно интенсивно убывает с понижением температуры топлива. При фиксированном давлении активного топлива, соответствующем режиму максимального КПД СН в диапазоне температур от 0 до минус 35°C понижение температуры топлива на 10°C вызывает уменьшение подачи СН примерно на $10...12\%$ от исходного значения. Охлаждение топлива в диапазоне температур от минус 35°C до ТНК минус 4°C сопровождается уменьшением подачи СН на $15...18\%$ от исходного значения.

С понижением температуры топлива от 0°C до ТНК наблюдается уменьшение коэффициента смешения СН примерно в 2,5 раза, чем, собственно, и вызвано уменьшение его подачи на выходе при работе с фиксированным давлением активного топлива.

Полученные низкотемпературные характеристики системы перекачки топлив с повышенной ТНК СН указывают на необходимость резервирования производительности СН при их подборе. Для обеспечения работоспособности системы перекачки, не имеющей регулирования давления активного топлива в широком диапазоне температур, включая ТНК, номинальная подача СН, соответствующая режиму максимального КПД, должна превышать потребную на выходе в 1,7 раза и по эжектируемому топливу – в 2,3...2,5 раза.

Дефицит производительности СН, вызванный низкотемпературным понижением его подачи, может быть устранен повышением давления активного топлива по мере понижения его температуры таким образом, чтобы СН постоянно работал в режиме максимального КПД. При этом значительного резервирования производительности СН не требуется.

При исследовании эффективности непрерывного перемешивания топлива центробежным насосом интенсивность кольцевой прокачки устанавливается идентичной подаче СН. При этом в процессе охлаждения с перемешиванием поддерживалось постоянное избыточное давление на выходе ЭЦН в пределах 0,08...0,075 МПа.

В рассматриваемом режиме топливо подвергается непрерывному гидромеханическому воздействию крыльчатки центробежного насоса и интенсивно перемешивается в баке. Результаты определения кинематической вязкости в процессе охлаждения в таких гидродинамических условиях приведены в табл.5 и на рис.6.

Таблица 5

Изменение кинематической вязкости топлива Jet A
при охлаждении с перемешиванием центробежным насосом

$t_T, ^\circ\text{C}$	- 10	- 20	- 35	- 40	- 45	- 48	- 49	- 50,5	- 52	- 54	- 56
$\nu_T, \text{мм}^2/\text{с}$	3,9	4,5	6,3	7,3	8,0	9,1	9,5	11,0	12,4	14,3	17,5

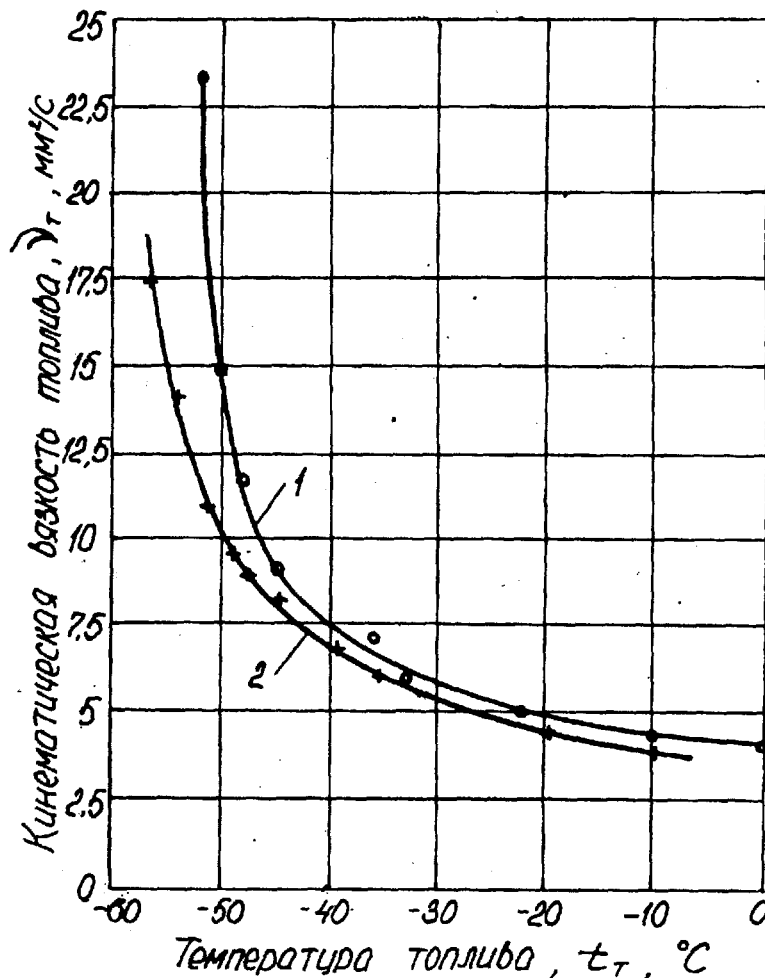


Рис.6. Зависимости кинематической вязкости топлива Jet A₄₈ от температуры, полученные на щелевом вискозиметре:

- 1 — при охлаждении топлива в статическом состоянии;
- 2 — при охлаждении с непрерывной кольцевой прокачкой топлива центробежным насосом

Сопоставление вязкостно-температурных характеристик топлива Jet A, полученных при охлаждении с перемешиванием центробежным насосом и при охлаждении в статическом состоянии позволяет оценить эффективность перемешивания топлива центробежным насосом.

При непрерывном гидромеханическом воздействии на топливо крыльчатки центробежного насоса при отрицательных температурах выше ТНК, как и в случае прохождения топлива через эжектор при перемешивании СН, происходит мятие жидкости, вследствие чего вязкостно-температурные характеристики, снятые в гидромеханических ежимах охлаждения, ложатся ниже характеристики, снятой в статике, примерно $,5...1 \text{ мм}^2/\text{с}$.

При охлаждении топлива ниже ТНК происходит разрушение образующих кристаллических связей крыльчаткой ЭЦН и резкое нарастание вязкости смещается к температурам примерно на 6°C более низким, чем при охлаждении в статическом состоянии топлива. Таким образом, непрерывное перемешивание топлива центробежным насосом беспечивает запас работоспособности топливной системы в условиях низких температур, позволяющий увеличить продолжительность полета без летных ограничений на $1...1,5$ часа.

Снятые напорные характеристики центробежного насоса, показанные на рис.7, позволяют оценить температурное понижение избыточного давления на выходе насоса. Так, при фиксированной подаче (600 л/ч) градиент температурного падения напора центробежного насоса при температурах выше ТНК составляет $0,4\%$ на градус, при температурах ниже ТНК – $1,6\%$ на градус.

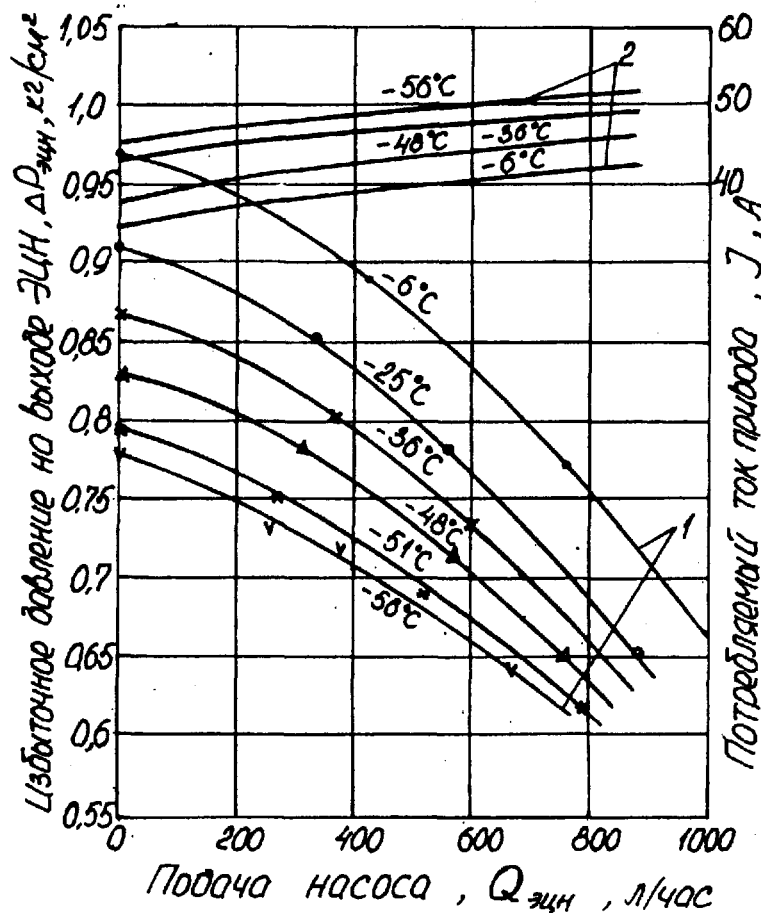


Рис. 7. Характеристики ЭЦН с электроприводом постоянного тока, снятые в процессе охлаждения с непрерывной кольцевой прокачкой:

1 — напорные характеристики $\Delta P_{\text{ЭЦН}}(Q)$; 2 — зависимость потребляемого тока I от подачи Q

Уменьшение напора центробежного насоса с понижением температуры однозначно определяется повышением вязкости прокачиваемого топлива [3]:

$$\Delta P_v = K_v \frac{\Delta \nu}{A_v - \Delta \nu} Q, \quad (4)$$

где ΔP_v – падение напора центробежного насоса, вызванное температурным повышением вязкости; K_v – коэффициент реагирования ЭЦН на изменение вязкости; $\Delta \nu$ – температурное изменение кинематической вязкости; Q – подача ЭЦН; A_v – эмпирическая константа для данного сорта топлива.

Расчеты с использованием полученных экспериментальных данных показывают, что формулу (4) можно применять для оценки вязкостно-температурного изменения напора ЭЦН при работе на заданном сорте топлива. Однако константы K_v и A_v существенно отличаются для диапазона температуры $t_T > t_{нк}$ и $t_T < t_{нк}$.

При охлаждении топлива в диапазоне температур от минус 30°С...минус 35°С до температуры ниже ТНК при фиксированном давлении на выходе центробежного насоса наблюдается резкое падение подачи с интенсивностью 3,5% на градус, что также является следствием температурного изменения вязкости топлива.

Как видно из приведенных на рис.7 характеристик центробежного насоса с электроприводом постоянного тока, охлаждение топлива сопровождается увеличением потребляемой мощности, обусловленным ростом момента на валу крыльчатки из-за повышения вязкости перекачиваемого топлива.

Проведено также исследование фильтруемости топлива с повышенной ТНК в процессе охлаждения до температур ниже ТНК.

В исследовании применялся топливный фильтр тонкой очистки с фильтроэлементом из металлической сетки саржевого плетения с толщиной фильтрации 12...15 мкм.

Фильтроэлемент препарирован с целью моделирования реальных режимов прокачки. Результаты исследований показаны на рис.8

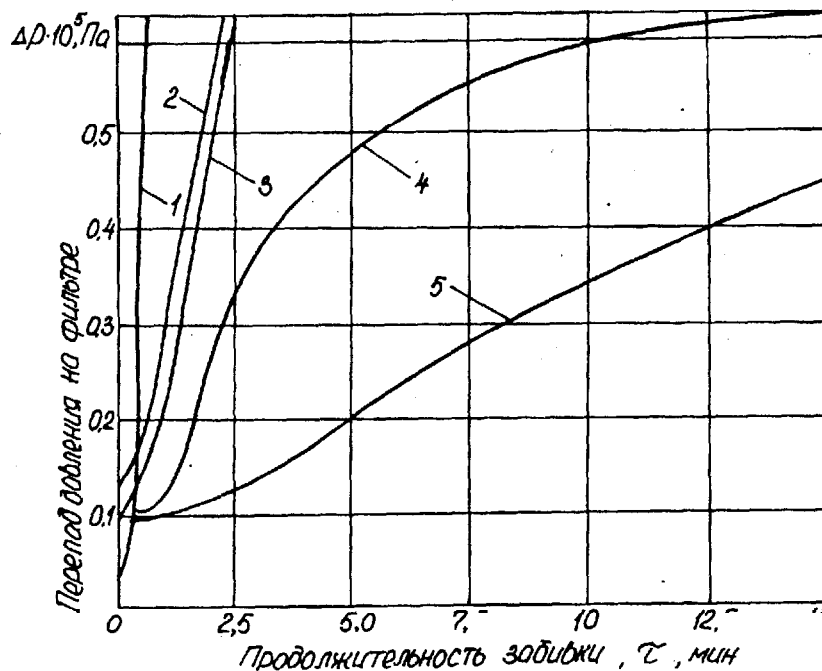


Рис.8. Скорость забивки фильтра тонкой очистки с фильтроэлементом 8Д5.886.528-3 кристаллами топлива:
1 – минус 56°С; 2 – минус 55°С; 3 – минус 54,5°С; 4 – минус 54°С; 5 – минус 53°С

Время забивки фильтроэлемента кристаллами топлива до открытия перепускного клапана фильтра зависит от подачи, температуры и состояния топлива. Если топливо при охлаждении находилось в баке в статическом состоянии, начало забивки фильтроэлемента происходит на 1...3⁰С ниже ТНК. При работе на смесевом топливе с температурой начала кристаллизации минус 52⁰С забивка фильтроэлемента до открытия перепускного клапана фильтра произошла при температуре минус 53,7⁰С, а на топливе с ТНК равной минус 55⁰С – при температуре минус 57,1⁰С. При наличии перемешивания топлива температура начала забивки фильтроэлемента на 3...5⁰С ниже ТНК, что свидетельствует о влиянии явления тиксотропии на процесс кристаллизации высокоплавких компонентов углеводородов.

Интенсивность забивки фильтроэлементов прямо пропорциональна понижению температуры. Так, при температуре топлива минус 53⁰С время забивки фильтроэлемента превышает 15 мин (ТНК топлива минус 52⁰С). Охлаждение топлива до минус 56⁰С резко сокращает продолжительность забивки фильтроэлемента до 1...1,5 мин.

После забивки фильтроэлемента кристаллами топлива прокачка топлива продолжалась через перепускной клапан фильтра, т.е. подача топлива к двигателю не прекращалась. При отогреве топлива в магистрали питания до ТНК фильтр полностью восстанавливал свою работоспособность и перепад давления на фильтре возвращался к исходному.

Ввод в топливо 0,1% масс противоводокристаллизационной жидкости ТГФ-М не изменил ТНК топлива и не оказал влияния на динамику забивки фильтроэлемента кристаллами углеводородов.

Одним из наиболее уязвимых элементов топливной системы при работе в условиях глубокого охлаждения является тонкотрубная система сигнализации и контроля. Сигнализаторы давления установлены на ВС вне топливных отсеков, а подводящие трубопроводы диаметром 6 мм проложены в местах, где в полете на большой высоте температура может быть значительно ниже температуры топлива в баках, в результате чего происходит их промерзание и возможен отказ сигнализаторов работы насосных агрегатов значительно раньше, чем топливо в баках утрачивает жидкотекучесть.

Для проверки эффективности проливки тонкотрубной системы манометры экспериментальной установки были оборудованы трубопроводами непрерывной проливки с погруженными в топливо жиклерами регулирования интенсивности проливки.

Регулированием определен минимальный расход топлива через проливаемые топливопроводы, который обеспечивает работоспособность манометров (сигнализаторов давления) до температуры топлива $t_n = t_{нк} - 8^0\text{С}$ и при этом не оказывает влияния на показания измерительного прибора.

Для обеспечения работоспособности тонкотрубной системы необходимо обеспечить проливку подводящих топливопроводов каждого измерительного прибора с расходом не менее 6 л/ч.

Выводы:

1. Разработан и апробирован метод экспериментального исследования вязкостно-температурных характеристик углеводородных топлив посредством щелевого насадка, обеспечивающего возможность определения вязкости при низких температурах, близких и ниже ТНК топлива.

2. Установлен эффект гидродинамического воздействия на углеводородное топливо в процессе его охлаждения, заключающийся в том, что при перемешивании топлива насосными агрегатами резкое нарастание вязкости наблюдается при температурах на 6...8⁰С ниже, чем при охлаждении в статическом состоянии.

3. При охлаждении топлива до температур, близких и ниже ТНК, подача топливных насосов существенно понижается, в связи с чем необходимо резервирование производительности центробежных и струйных насосов при их подборе.

4. Прокачиваемость топливного фильтра тонкой очистки нарушается при температуре топлива на 2...5°C ниже ТНК.

5. Непрерывная проливка топливом трубопроводов сигнализации и контроля топливной системы с подачей около 6 л/ч сохраняет работоспособность сигнализации до температур ниже ТНК топлива.

Список литературы

1. *Отчет* о научно-исследовательской работе по теме 382-ГБ93, КМУГА, 1995.
2. Дубовкин Н.Ф., Маланичев В.Т., Массур Ю.П. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив. -М.: Химия, 1985. -218 с.
3. Аринушкин Л.С., Абрамович Л.П., Полуновский Л.Ю. Авиационные центробежные насосные агрегаты. - М.: Машиностроение, 1967. - 287 с.

Стаття надійшла до редакції 23 грудня 1998 року.



Олександр Іванович Козаченко (1939) закінчив Харківський авіаційний інститут в 1962 році. Кандидат технічних наук професор. З 1979 року декан факультету паливно-мастильних матеріалів, з 1982 року – проректор заочного факультету, з 1996 року – проректор Київського міжнародного університету цивільної авіації. Має більше 30 наукових та науково-методичних праць. Нагороджений двома медалями.

Olexandr I. Kozatchenko (b.1939) graduated from Kharkiv Aviation Institute (1962). PhD (Eng), professor. Since 1979 Dean of Fuels and Lubricants Department, since 1982 pro-rector of Correspondence Department and since 1996 pro-rector of Kyiv International University of Civil Aviation. Author of more than 30 scientific and methodical publications. He is rewarded by two medals.



Петро Федорович Максютинський (1934) закінчив Харківський авіаційний інститут в 1958 році. Кандидат технічних наук, доцент. Має великий досвід науково-дослідної роботи в галузі функціональних систем літаків, їх проектування та випробування. Автор більше 50 наукових праць та 16 винаходів.

Petro F. Maksyutinsky (b.1934) graduated from Kharkiv Aviation Institute (1958). PhD (Eng), ass. professor, experienced scientific researcher in the field of design and testing of aeroplane functional systems, author of more than 50 publications and 16 inventions.