

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТОПЛИВ ДЛЯ АВИАТЕХНИКИ С ГАЗОТУРБИННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ



ГНЦ РФ ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова":

Евгений Петрович Федоров, к.т.н., ведущий научный сотрудник

Наталья Ивановна Варламова, начальник сектора

Леонид Самойлович Яновский, д.т.н., начальник отдела

Иван Михайлович Попов, инженер-химик 1ой категории

Представлен сравнительный анализ основных марок отечественных и зарубежных реактивных топлив. Определены пути их развития в направлении повышения термоокислительной стабильности (ТОС). Показана перспективность повышения ТОС введением гидрогенизационных процессов в технологию производства топлив. Рекомендовано сокращение номенклатуры отечественных реактивных топлив до двух марок: Т-8В и Т-6. Отмечено отставание России в разработке промышленной технологии производства реактивных топлив из альтернативного сырья: угля, природного газа, биомассы

A comparative analysis of the major brands of domestic and foreign jet fuels is presented. The ways of their development towards improving the thermal oxidative stability. The increasing thermal oxidative stability can be supported by hydrogenation processes in fuel production manufacturing. The reducing the number of domestic jet fuel to two brands T-8V and T-6 is recommended. Russia has the lag in the development of industrial technology for production of jet fuels from alternative raw materials: coal, natural gas, biomass.

Ключевые слова: реактивное топливо, термоокислительная стабильность, гидрогенизационные процессы, функциональные присадки

Keywords: jet fuel, thermal oxidative stability, hydrogenisation processes, functional additives

Развитие реактивных топлив для авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) определяется компромиссом между возрастающими требованиями к качеству топлива со стороны авиадвигательстроителей и возможностями нефтеперерабатывающей промышленности удовлетворить эти требования.

Совершенствование авиационных ГТД сопровождается увеличением температуры воздуха и газа по тракту двигателя, т.е. ростом его теплонапряженности, и, как следствие, увеличивающимся сбросом тепла в топливо. Поэтому одним из основных постоянно действующих требований к качеству топлива является повышение его термоокислительной стабильности (ТОС), что обеспечивает повышение предельной допустимой температуры применения топлива без ухудшения прочих показателей качества.

Нефтеперерабатывающая промышленность реализует повышение ТОС топлив путем разработки соответствующих присадок и введением в технологию производства реактивных топлив гидрогенизационных процессов (гидроочистки, гидрокрекинга, глубокого гидрирования). Эти процессы удаляют из топлива нестабильные гетероатомные примеси (особенно, меркаптановую серу), ответственные за ТОС топлива.

Другим весьма востребованным требованием к реактивным топливам является улучшение его энергетических показателей: массовой и объемной теплоты сгорания. Возможность увеличения массовой теплоты сгорания топлив очень ограничена, так как все жидкие углеводороды имеют практически одинаковую массовую теплоту сгорания. Увеличение объемной теплоты сгорания (энергоемкости) достигается путем повышения плотности топлива, в частности, путем утяжеления его фракционного состава.

В настоящее время в номенклатуру основных марок отечественных реактивных топлив входят ТС-1 и РТ (ГОСТ 10227-2013), Т-8В и Т-6 (ГОСТ 12308-2013). Основные показатели этих топлив представлены в табл. 1.

Прямоегонное топливо ТС-1, являясь самым доступным и широко применяемым в

авиации, по термоокислительной стабильности уже не удовлетворяет условиям эксплуатации в передовых современных и, тем более, перспективных теплонапряженных ГТД.

Гидрогенизационные топлива РТ, Т-6 и Т-8В не уступают, а по ряду показателей (например, по содержанию ароматических углеводородов, температуре начала кристаллизации) превосходят лучшие зарубежные марки реактивных топлив 1. Топлива РТ, Т-6 и Т-8В удовлетворяют условиям применения в современных и перспективных теплонапряженных ГТД.

Топливо РТ в настоящее время является унифицированным реактивным топливом, допущенным к применению на всех отечественных дозвуковых и сверхзвуковых летательных аппаратах с ГТД. Однако оно уступает по объемной теплоте сгорания более плотным и менее летучим топливам Т-8В и Т-6. При заправке сверхзвукового самолета топливом РТ вместо Т-6 даль-

Таблица 1

№	Показатель	Нормы по ГОСТ			
		ТС-1	РТ	Т-8В	Т-6
1	Плотность при 20°C, кг/м³, не менее	780	775	800	840
2	Фракционный состав: а) температура начала перегонки, °C, не ниже б) температура конца кипения, °C, не выше	150 250	135 280	165 280	195 315
3	Кинематическая вязкость, сСт При минус 20°C, не более При минус 40°C, не более	8,0 8,0	8,0 16,0	- 16,0	- 60,0
4	Низшая теплота сгорания, кДж/кг, не менее	43120	43120	42900	42900
5	Высота некоптящего пламени, мм, не менее	25	25	20	20
6	Кислотность, мг КОН на 100 см³ топлива, не более	0,7	0,2-0,7	0,2-0,7	0,7
7	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °C, не ниже	28	28	45	62
8	Температура начала кристаллизации, °C, не выше	-60	-60	-60	-60
9	Термоокислительная стабильность в статических условиях при 150 °C, а) концентрация осадка, мг на 100 см³ топлива, не более б) концентрация растворимых смол, мг на 100 см³ топлива, не более в) концентрация нерастворимых смол, мг на 100 см³ топлива, не более	18 - -	6 30 3	6,0 - -	6,0 60 Отс.
10	Массовая доля ароматических углеводородов, %, не более	22	22	22	10
11	Концентрация фактических смол, мг на 100 см³ топлива, не более	3	4	4	4
12	Массовая доля общей серы, %, не более	0,20	0,10	0,10	0,05
13	Массовая доля меркаптановой серы, %, не более	0,003	0,001	0,001	Отс.

ность полета самолета уменьшается примерно на 10%.

Топлива утяжеленного фракционного состава Т-8В и Т-6, благодаря меньшему, чем у РТ, давлению насыщенных паров, более устойчивы к образованию паровых пробок в каналах топливной системы двигателя при повышенной температуре и при пониженном давлении топлива (например, на режиме высотного малого газа).

По цене топлива Т-8В и Т-6 дороже топлив ТС-1 и РТ, примерно на 10-20%.

В настоящее время топлива Т-8В и Т-6 не производятся, главным образом, из-за отсутствия заказов. Все учебно-тренировочные полеты на сверхзвуковых самолетах, у которых основным видом топлива является Т-8В или Т-6, выполняются на топливе РТ. Такое отношение к топливам Т-8В и Т-6 следует признать недальновидным, так как для организации производства этих топлив в особый период потребуется время, в течение которого эксплуатанты окажутся без топлив, которые обеспечивают лучшие, чем более легкое топливо РТ, тактико-технические характеристики летательных аппаратов.

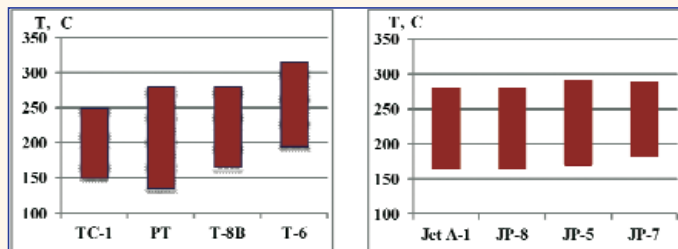
Промышленное производство топлив Т-8В и Т-6 находится в русле стоящей перед нефтеперерабатывающими предприятиями России проблемы увеличения выхода светлых нефтепродуктов из нефти с применением гидрогенизационных процессов. По этому показателю Россия значительно уступает развитым зарубежным странам.

Те же, что в табл.1, показатели основных марок зарубежных реактивных топлив представлены в табл.2.

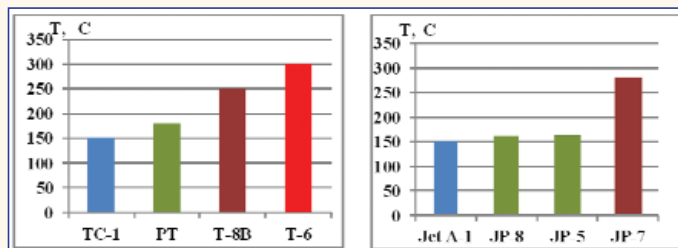
Основной зарубежной маркой авиакеросина для гражданской авиации является Jet A-1 (ASTM D 1655). Военная авиация США эксплуатируется на трех марках авиакеросина: JP-8 (MIL-DTL-83133) для авиатехники наземного базирования, JP-5 (MIL-T-5624) для самолетов и вертолетов корабельного базирования и JP-7 (MIL-38219) для самолетов с высокой сверхзвуковой скоростью полета большой продолжительности.

Топливо Jet A-1 может быть как прямогонным, так и гидрогенизационным. По фракционному составу оно близко к отечественному топливу Т-8В, по термоокислительной стабильности - к современному ТС-1 (рис. 1 и 2).

Топливо JP-8 по показателям качества практически не отличается от Jet A-1, за исключением показателя "массовая доля меркаптановой серы": "не более 0,002%" у топлива JP-8 и "не более 0,003 %" у топлива Jet A-1. Топливо JP-5 по технологии производства и физико-химическим показателям аналогично JP-8, но имеет большую, чем JP-8, температуру вспышки:



а) б)
Рис. 1. Фракционный состав отечественных (а) и зарубежных (б) реактивных топлив



а) б)
Рис. 2. Предельные температуры применения отечественных (а) и зарубежных (б) реактивных топлив

"не ниже 60°C" у топлива JP-5 и "не ниже 38°C" у JP-8. Более высокая температура вспышки у топлива JP-5 удовлетворяет требованиям к минимально допустимой температуре вспышки топлива в условиях трюмного корабельного базирования самолетов и вертолетов. В этой связи применение топлив ТС-1 и РТ с температурой вспышки "не ниже 28°C" на отечественных самолетах и вертолетах корабельного базирования по условиям противопожарной безопасности представляется рискованным. Более безопасным в этом отношении было бы применение топлива Т-6 с браковочной нормой по температуре вспышки "не ниже 62°C".

Самое широко применяемое зарубежное топливо для военной авиации JP-8, так же, как и отечественное топливо ТС-1, уже не удовлетворяет условиям применения в высокотемпературных ГТД. В США максимально-допустимая температура применения топлива JP-8 была повышена с 325°F до 425°F (с 163°C до 218°C), т.е. на 100°, с помощью специально разработанной полифункциональной присадки. Модернизированная марка топлива JP-8 получила наименование JP-8+100. Марка отвечает техническим требованиям спецификации MIL-DTL-83133 на топливо JP-8, но в отличие от JP-8, имеющего код NATO F-35, имеет код NATO F-37.

В США ведутся работы по созданию специального синтетического реактивного топлива JP-900 с допустимой температурой применения 480°C (до температуры термодеструкции) и топлива JP-8+250 с температурой применения до 280°C с полифункциональной присадкой. Поиски присадки продолжаются.

Вступление России в международное экономическое сообщество, продажа отечественной авиатехники за рубеж, расширение сети международных авиаперевозок требует обеспечения взаимозаменяемости отечественных и зарубежных авиационных топлив. В этом отношении организация в России промышленного производства топлив Т-8В и Т-6, как основных унифицированных отечественных марок реактивных топлив, является весьма востребованной.

Топливо Т-8В по фракционному составу и давлению насыщенных паров близко к топливам Jet A-1 и JP-8, а по термоокислительной стабильности превосходит топливо JP-8+100. Топливо Т-6 может найти применение вместо JP-5 и JP-7.

Таблица 2

№	Показатель	Нормы по ASTM			
		JET A-1	JP-8	JP-5	JP-7
1	Плотность при 15°C, кг/м³	775-840	775-840	788-845	779-806
2	Фракционный состав: а) температура начала перегонки, °C, не ниже д) температура конца кипения, °C, не выше	150	182	180	195
		300	300	330	300
3	Кинематическая вязкость, сСт При минус 20°C, не более	8,0	8,0	8,5	16,0
4	Низшая теплота сгорания, кДж/кг, не менее	42800	42800	42600	43500
5	Высота некоптящего пламени, мм, не менее	25	25	19	20
6	Кислотность, мг КОН/г, не более	0,1	0,015	0,015	-
7	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °C, не ниже	38	38	60	60
8	Температура начала кристаллизации, °C, не выше	-47	-47	-46	-43,3
9	Термоокислительная стабильность при контрольной температуре 260°C: - перепад давления на фильтре, мм.рт.ст., не более - отложения на трубке, балл, не более	25	25	25	25*
		3	3	3	3
10	Массовая доля ароматических углеводородов, %, не более	22	25	25	5
11	Концентрация фактических смол, мг на 100 см³ топлива, не более	7	7	7	5
12	Массовая доля общей серы, %, не более	0,3	0,3	0,4	0,1
13	Массовая доля меркаптановой серы, %, не более	0,003	0,002	0,002	0,001

Следует отметить, что создание облегченных по фракционно-му составу, по сравнению с зарубежными широкоприменяемыми реактивными топливами, отечественных топлив ТС-1 и РТ ранее диктовалось структурой потребления топлив в СССР, при которой производство дизельных топлив было в несколько раз больше, чем бензинов. В настоящее время в связи с большим ростом в России парка автотранспорта структура потребления отечественных топлив приближается к структуре потребления топлив в развитых зарубежных странах, и смещение в сторону утяжеления фракционного состава отечественных реактивных топлив больше соответствует современной и перспективной структуре потребления топлив в России.

Сокращение номенклатуры основных марок отечественных реактивных топлив до двух - Т-8В и Т-6, отказ от топлива ТС-1 - перспективный путь сокращения номенклатуры реактивных топлив, однако он станет возможным только при условии широкого внедрения в технологию нефтепереработки процессов глубокой переработки нефти с применением гидрогенизационных процессов.

Внедрение в нефтепереработку гидрогенизационных процессов будет способствовать повышению термостабильности реактивных топлив, значительно большему, чем от введения в них специальных присадок. Рекомендованные нормативной документацией максимальные температуры применения топлив Т-8В и Т-6 составляют 250 °С и 300 °С, соответственно, и антиокислительная присадка Агидол-1, эффективная до температуры 150 °С, вводится в них только для обеспечения длительного хранения и совместимости топлива с уплотнительными материалами. Специальные, в том числе полифункциональные, присадки для повышения термостабильности топлив теряют свою эффективность уже при температурах, приближающихся к 200 °С. Это означает, что повысить термоокислительную стабильность современного топлива ТС-1 с помощью присадки можно практически только до уровня ТОС зарубежного топлива JP-8+100. Такая отечественная полифункциональная присадка была разработана Центральным институтом авиационного моторостроения (ЦИАМ им. П.И. Баранова) совместно с Российским государственным университетом нефти и газа [2]. Однако дальнейшее повышение ТОС реактивных топлив с помощью присадок представляется непродуктивным.

Генеральным путем повышения ТОС реактивных топлив, как отражено выше, является введение гидрогенизационных процессов в технологию их производства.

В современных условиях возможность применения в России высокотермостабильных реактивных топлив с температурой выше 150 - 180 °С перед основным качающим узлом топливного насоса ПД упирается в работоспособность всепогодных отечественных манжет насосов при этих температурах. Манжеты должны надежно работать как при высоких, так и низких температурах (до минус 60 °С). Поэтому одновременно с повышением ТОС реактивных топлив должна решаться задача производства соответствующих уплотнительных резино-технических материалов, работоспособных в требуемом диапазоне температур применения. В настоящее время в России такие резино-технические материалы отсутствуют, и на теплонпряженных авиационных ПД приходится для уплотнения приводного вала основного топливного насоса ставить пакет манжет, включающий манжеты как из теплостойких резин, но не работоспособных при низких отрицательных температурах, так и из резин с меньшей, чем требуемая, теплостойкостью, но работоспособных при глубоких низких температурах. Необходимость создания в России резино-технических материалов требуемого качества весьма актуальна.

Стандартные отечественные авиакеросины ТС-1, РТ, Т-8В могут содержать ароматические углеводороды в количестве не более 22% масс., а зарубежные Jet A-1, JP-8, JP-5 - до 27% масс. Отечественная авиатехника на международных авиалиниях и продаваемая за рубеж должна надежно эксплуатироваться на зарубежных авиакеросинах, в том числе с предельным содержанием ароматических углеводородов, и, следовательно, должна надежно работать на топливах с повышенным содержанием арома-

тических углеводородов, т.е. обрабатываться на специальном для испытаний отечественном топливе. В США такое топливо JP-5 ST называется "специальным для испытаний" (специальным тестовым). Оно отвечает спецификации на топливо JP-5, но с содержанием ароматических углеводородов 23-27% об.(25-29% масс). Аналогичное топливо в России не производится, и его производство необходимо организовать.

Отечественные реактивные топлива должны производиться без использования в них зарубежных компонентов. В настоящее время в отечественные гидрогенизационные топлива вводится зарубежная противоизносная присадка Хайтек-580. В современных условиях борьбы с импортозамещением необходимо срочно разработать отечественную противоизносную присадку.

В особый период отечественная авиатехника должна иметь возможность работать на прямогонном реактивном топливе широкого фракционного состава Т-2 (ГОСТ 10227-2013), которое имеет повышенный выход из нефти. Отечественные ПД должны проходить краткосрочные испытания на этом топливе для установления возможных ограничений по его применению. Испытания на топливе Т-2 в России не выполняются из-за отсутствия его производства, несмотря на то, что оно включено как резервное в эксплуатационную документацию двигателей.

Таким образом, следует признать, что развитие отечественных реактивных топлив должно соответствовать направлению широкого применения топлива Т-8В в гражданской и военной авиации и топлива Т-6 для специального применения на самолетах с большой продолжительностью сверхзвукового полета и самолетах и вертолетах корабельного базирования. Нефтеперерабатывающая промышленность России располагает необходимыми сырьевой базой и мощностями для производства этих топлив [3]. Топливо ТС-1 должно быть постепенно выведено из применения в авиации, как это произошло с нетермостабильным реактивным топливом Т-1 (ГОСТ 10227-86).

В связи с неизбежным истощением природных запасов нефти разработка и внедрение технологий промышленного производства синтетических топлив из альтернативного сырья (в том числе для авиационных газотурбинных двигателей) уже в настоящее время актуальны.

В деле производства альтернативных реактивных топлив из угля, природного газа и биосырья Россия значительно уступает передовым зарубежным странам. За рубежом в промышленном масштабе изготавливаются и допущены к применению на авиатехнике синтетические авиакеросины, производимые из угля и природного газа по спецификации ASTM D 7756-14 (стандарт на топливо для авиационных газотурбинных двигателей, содержащее синтезированные углеводороды). Имеются опытно-промышленные установки по производству биокеросина. В спецификацию ASTM D 7756-14 включено синтетическое реактивное топливо из семян масличных растений - камелины и ятрофы.

В нашей стране имеется лишь некоторый научно-технический задел по созданию лабораторных регламентов получения синтетических реактивных топлив. Исследования по разработке отечественных альтернативных авиакеросинов проводились по инициативе ЦИАМ. К этим исследованиям ЦИАМ были привлечены:

- Институт горючих ископаемых (ИГИ) для разработки опытного образца реактивного топлива из угля,
- НК-Роснефть ("Центр исследований и разработок") для разработки опытного образца реактивного топлива из природного газа,
- Московская академия тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова (МИТХТ) для разработки опытного образца реактивного топлива из биосырья (биоэтанола).

Опытные образцы реактивных топлив разрабатывались по техническим требованиям ЦИАМ. ЦИАМ проверял синтезированные опытные образцы на соответствие заданным ТТ, отбраковывал не отвечающие этим требованиям, тем самым определяя направление для дальнейших исследований по совершенствованию лабораторного регламента. Проведенными совместными исследованиями была доказана возможность получения в лабораторных условиях опытных образцов синтетических топлив, отвечающих требованиям,

Таблица 3

№	Показатель	Нормы ТТ ЦИАМ	Фактические данные		
			из угля	из биосырья	из газа
1	Плотность при 20°C, кг/м³, не менее	755	785	790	757
2	Фракционный состав: а) температура начала перегонки, °C, не ниже д) температура конца кипения, °C, не выше	135 280	124 220	135 196	148 253
3	Кинематическая вязкость, сСт При минус 20°C, не более При минус 40°C, не более	8,0 16	- 4,5	2,19 3,7	3,5 6,8
4	Низшая теплота сгорания, кДж/кг, не менее	43120	43290	43100	44050
5	Высота некоптящего пламени, мм, не менее	25	36	31	32
6	Кислотность, мг КОН на 100 см³ топлива, не более	0,7	0,5	0,1	0,1
7	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °C, не ниже	28	37	25	44
8	Температура начала кристаллизации, °C, не выше	-60	Ниже -60	Ниже -60	-58
9	Термоокислительная стабильность в статических условиях при 150 °C, а) концентрация осадка, мг на 100 см³ топлива, не более б) концентрация растворимых смол, мг на 100 см³ топлива, не более в) концентрация нерастворимых смол, мг на 100 см³ топлива, не более	6 30 3	1,8 1,2 Отс.	2,0 5,5 3	Отс. 18 1,5
10	Массовая доля ароматических углеводородов, %, не более	22	6,2	6,9	9,6
11	Концентрация фактических смол, мг на 100 см³ топлива, не более	4	Отс.	3,0	1,3
12	Массовая доля общей серы, %, не более	0,1	0,0003	Отс.	0,0042
13	Массовая доля меркаптановой серы, %, не более	0,001	Отс.	Отс.	Отс.

предъявляемым к стандартным отечественным реактивным топливам (табл.3).

Разработка прогрессивной технологии промышленного производства альтернативных топлив и их рационального применения на транспортных средствах (в том числе в авиации) уже в настоящее время являются актуальными и для нашей страны. **П**

Литература

1. Дубовкин Н.Ф., Яновский Л.С., Харин А.А. и др. Топлива для воздушно-реактивных двигателей. - М.: "МАТИ"-2001. - 443с.
2. Вишнякова Т.П., Варламова Н.И., Федоров Е.П., Яновский Л.С., Пустырев О.Г., Голубева И.А. Присадка для повышения ТОС углеводородного реактивного топлива и реактивное топливо. Патент РФ № 2372382, 10.11.2009.
3. Хавкин В.А., Гуляева Л.А., Белоусов А.И. Производство реактивных топлив повышенной плотности (Т-8В и Т-6)/Журнал "Мир нефтепродуктов".- 2015 № 4, С. 13-16

Связь с авторами:

fep@ciam.ru,
varlamova@ciam.ru,
yanovskiy@ciam.ru
pim@ciam.ru.

ИНФОРМАЦИЯ

С ЛЮБОВЬЮ К РОДНОМУ КРАЮ

В конце января 2016 в вестибюле административного корпуса НИЦ ЦИАМ прошла персональная выставка живописных работ члена творческого Союза художников России, Международной федерации художников, члена Союза художников Подмосковья Анатолия Николаевича Петухова.

Он - известный ученый, профессор, доктор технических наук, действительный член Российской академии естественных наук, автор около четырехсот научных публикаций - более сорока лет участвует в городских, областных, всесоюзных выставках. Его работы находятся в частных собраниях, в общественных организациях России и за рубежом.

Анатолий Николаевич владеет жанрами изобразительного искусства - графикой и живописью. Почетное место на выставке занимают портреты генеральных конструкторов авиакосмической техники, Героев Социалистического Труда Архипа Михайловича Люльки и Николая Дмитриевича Кузнецова.

Необыкновенные пейзажи подмосковной природы и родного края и трогательные натюрморты - "Тихий вечер Москвы-реки", "Отражение", "Осень", "Тихая вода. Река Нара", "Перед грозой", "Заброшенное поле", "Букет лесных опушек", "Август. Цветы придорожные", "Последние цветы лета", "Петровское. Осень", "Волкуша. Золо-

Надежда ЯНИНА газета "Голос Лыткарино" тая осень", "Отцветает иван-чай" и другие картины трогают своей глубиной и любовью к родным местам. Его теплые живописные работы излучают внутренний свет доброты, которой автор хочет поделиться со всеми, кому не безразлично настоящее искусство.

Презентация выставки позволила представителям молодого поколения узнать Анатолия Николаевича, научные работы которого были отмечены международными дипломами конгрессов и симпозиумов за решение проблем прочности современных авиационных двигателей летательных аппаратов, с новой творческой стороны. Они увидели картины, в которых время как бы замирает, а автор демонстрирует уникальную способность останавливать мгновения. А в книге отзывов появилась еще одна запись, где коллеги благодарят его за прекрасные картины и желают новых творческих успехов. **П**

