

УДК 623.1/7

doi: 10.18698/0536-1044-2018-11-84-89

Оценка вероятности отказов воздухо-воздушных теплообменников при эксплуатации авиационных систем кондиционирования воздуха

А.Р. Галимов¹, В.И. Меркулов², И.В. Тищенко²

¹ ПАО НПО «Наука»

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

An Assessment of the Probability of Failure of Air-to-Air Heat Exchangers when Operating Air-Conditioning Systems

A.R. Galimov¹, V.I. Merkulov², I.V. Tishchenko²

¹ Scientific and Production Association PAO NPO Nauka

² Bauman Moscow State Technical University

Система кондиционирования воздуха авиационной техники содержит несколько воздухо-воздушных теплообменников. Авиационные теплообменники характеризуются максимальной интенсификацией теплообмена, минимальными габаритными размерами и гидравлическим сопротивлением. Это обуславливает применение в их конструкции тонкостенных элементов, и, следовательно, усложнение технологии изготовления. Проведен статистический анализ отказов воздухо-воздушных теплообменников, являющихся частью системы кондиционирования воздуха авиационной техники и обеспечивающих комфортные параметры микроклимата на борту. Определена наработка воздухо-воздушных теплообменников различной конструкции, выполнен анализ их отказов в период эксплуатации. Для оценки эффективности теплообменных аппаратов использована вероятность отказов вследствие негерметичности узлов и конструкций теплообменников.

Ключевые слова: охлаждающий воздух, летательный аппарат, воздухо-воздушный теплообменник, вероятностная оценка эффективности, система кондиционирования воздуха, авиационная техника

The air conditioning system of aviation equipment contains several air-to-air heat exchangers. Air heat exchangers are characterized by maximum intensification of heat exchange, minimum overall dimensions and hydraulic resistance. This justifies the use of thin-walled elements in their design and, consequently, more complex manufacturing technology. This article presents a statistical analysis of failures of air-to-air heat exchangers that constitute part of the air conditioning system of aviation equipment that provide comfortable microclimate on board. The operating life of air-to-air heat exchangers of various design is determined and an analysis of failures during the operation period is performed. The probability of failure due to leakage of units and structures of air-to-air heat exchangers is used as an indicator to assess the efficiency of heat exchangers.

Keywords: cooling air, aircraft, air-to-air heat exchanger, probabilistic performance evaluation, air conditioning system, aviation technology

В настоящее время все летательные аппараты оснащены системами кондиционирования воздуха, обеспечивающими нормальные условия для жизнедеятельности экипажа и пассажиров, а также для работы оборудования [1]. Кондиционирование воздуха в самолетах и вертолетах предназначено для поддержания на заданном уровне таких параметров, как температура, влажность и давление. Анализ современных систем кондиционирования воздуха показал, что масса теплообменников на некоторых самолетах достигает 30 % массы системы [2].

К теплообменным аппаратам системы жизнеобеспечения относятся радиаторы, конденсаторы, испарители, различные подогреватели, охладители газов и жидкостей [3].

Цель работы — определение вероятности отказов вследствие негерметичности различных воздухо-воздушных теплообменников (ВВТ) систем кондиционирования воздуха.

Основными задачами являются систематизация различных типов ВВТ на основе анализа отказов и вероятностной оценки эффективности и надежности и вычисление эксплуатационного ресурса. Под надежностью будем пони-

мать свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и хранения [4–6]. Для решения указанных задач выбран статистический анализ как основной способ определения показателей эксплуатационного ресурса изделия.

ВВТ нашли широкое и разнообразное применение в современной технике, в том числе и в летательных аппаратах. Существует большое количество авиационных ВВТ, различных по назначению и конструктивному исполнению. Вероятностная оценка эффективности позволит создать методику ресурсных испытаний, что поможет снизить энергозатраты на испытательный цикл при разработке ВВТ [7, 8].

В статье [9] выполнен анализ семнадцати ВВТ, разработанных специалистами ПАО НПО «Наука», характеристики которых приведены в табл. 1, где T_{r1} и T_{r2} — температура на входе и выходе горячего воздуха; T_{x1} — температура на входе холодного воздуха; G_1 и G_2 — расход горячего и холодного воздуха. Объем выборок для всех ВВТ равнялся 33.

Таблица 1

Характеристики ВВТ

Номер ВВТ	Масса, кг	T_{r1} , °C	T_{r2} , °C	T_{x1} , °C	Марка материала	G_1 , кг/ч	G_2 , кг/ч
1	6,7	106	66	25,0	АМц, АПС-1М, АМг6	200	180
2	60,0	290	80	50,0	АМц, АПС-1М, АМг6	3500	10 500
3	90,0	280	60	41,0	АМц, АПС-2М, АМг3	2500	7500
4	60,0	490	230	116,0	12Х18Н10Т	4000	5000
5	45,0	300	200	20,0	12Х18Н10Т	5040	3060
6	45,0	315	225	17,0	12Х18Н10Т	5040	3060
7	29,0	230	40	31,0	АМц, АПС-1М, АМг6	2500	7500
8	29,0	240	60	50,0	АМц, АПС-2М, АМг3	2500	7500
9	29,0	220	70	60,0	АМц, АПС-1М, АМг3	2500	7500
10	6,5	43	40,5	31,0	АМц, АПС-1М, АМг6	2540	2540
11	3,9	45	32	-23,0	АМц, АПС-1М, АМг6	2540	2500
12	17,2	180	130	110,0	АМц, АПС-2М, АМг6	2560	5400
13	13,5	180	130	110,0	АМц, АПС-2М, АМг6	2560	5400
14	20,5	398	225	91,0	12Х18Н10Т	694	1670
15	20,5	376	230	13,5	12Х18Н10Т	900	900
16	16,0	46	43	37,0	АМц, АПС-1М, АМг3	800	1440
17	9,0	400	101	88,0	12Х18Н10Т	800	2600

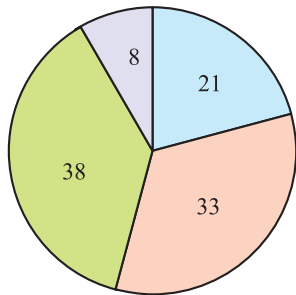
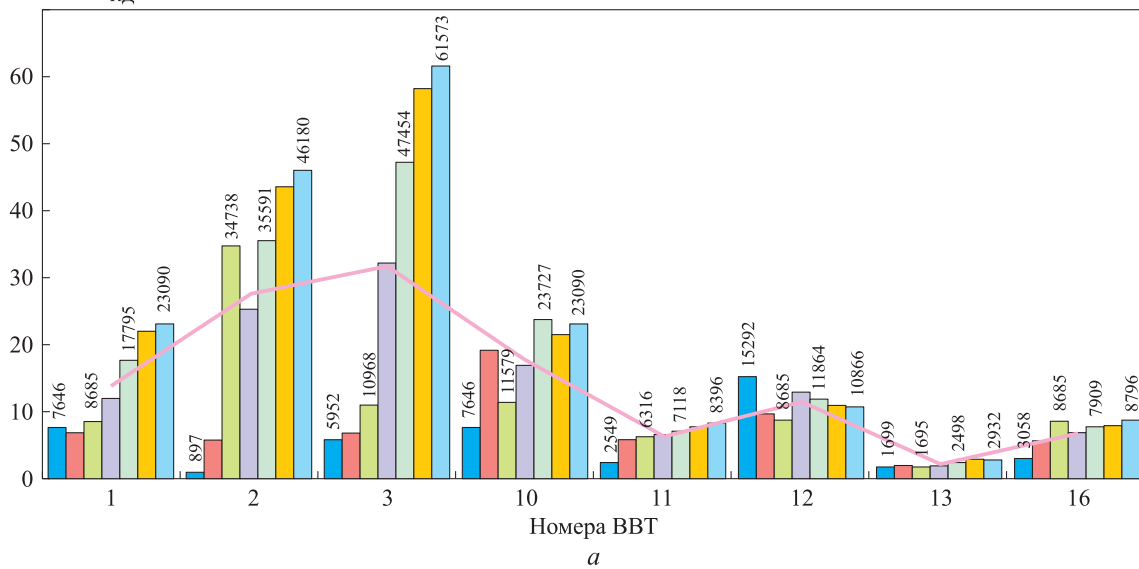


Рис. 1. Распределение отказов ВВТ № 1, %:
 — негерметичность вследствие усталости материала;
 — следы нагара и сажи по стыку матрицы; — течь по сварным швам; — замыкания на поверхностях патрубков

Как показал анализ полученных данных, основные причины отказов ВВТ вызваны разрушением:

- охлаждающего пакета в результате скрытых дефектов производства, т. е. с потерей герметичности;
- крайних элементов горячей полости ВВТ из-за некачественных процессов сварки и пайки;
- крайних элементов горячей полости ВВТ вследствие конструктивных дефектов и жестких условий эксплуатации;
- пакета охлаждающих элементов по углам в результате возникновения циклических терми-

$T \cdot 10^{-3}; T_{\text{КД}} \cdot 10^{-3}, \text{ч}$



$T \cdot 10^{-3}; T_{\text{КД}} \cdot 10^{-3}, \text{ч}$

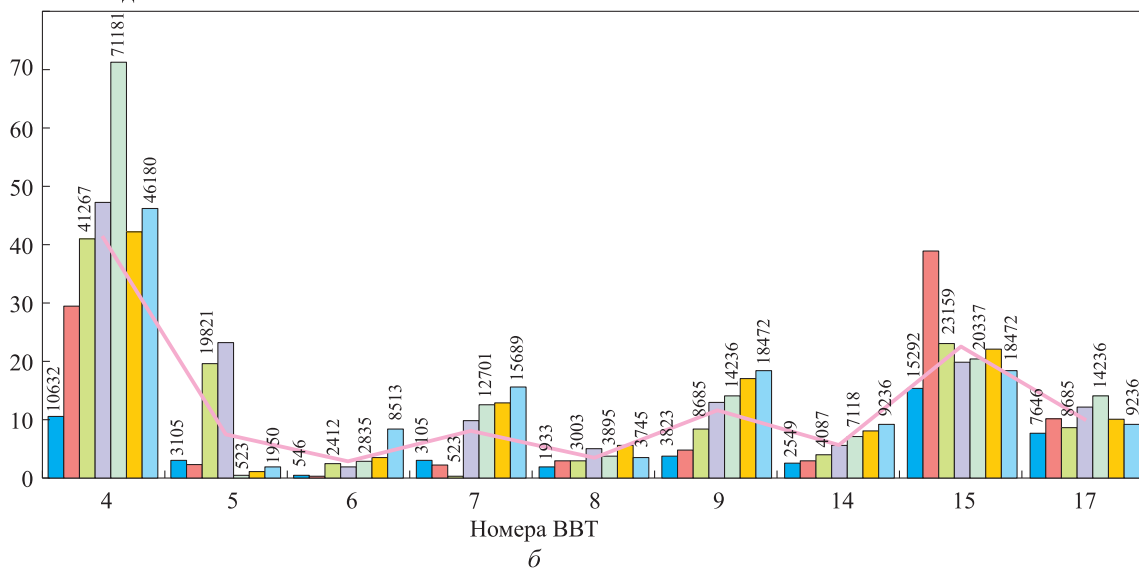


Рис. 2. Средняя наработка на отказ ВВТ из алюминиевых (а) и стальных (б) сплавов для различных периодов эксплуатации:
 — T за 1 год; — T за 2 года; — T за 3 года; — T за 4 года; — T за 5 лет;
 — T за 6 лет; — T за 7 лет; — $T_{\text{КД}}$ за 7 лет

ческих напряжений из-за большой разности температур воздушных потоков [10–12].

Данные о причинах отказов ВВТ позволили получить распределение отказов за весь период эксплуатации. В качестве примера на рис. 1 приведено распределение отказов ВВТ № 1.

Из диаграммы следует, что большая часть отказов вызвана негерметичностью конструкций ВВТ. Для выявления этого дефекта конструкции ВВТ выполняют проверку герметичности ВВТ воздухом в ванне с водой, а также полости охлаждаемого и охлаждающего воздуха избыточным давлением. Испытания проводят поочередно. При этом падение давления, определяемое переоток из полости охлаждаемого воздуха в полость охлаждающего воздуха, допускается, а утечка воздуха во внешнюю среду — нет.

На рис. 2 приведена средняя наработка на отказ T для различных периодов эксплуатации алюминиевых (№ 1, 2, 3, 10–13, 16) и стальных (№ 4–9, 14, 15, 17) ВВТ, а также (для сравнения) заданная конструкторской документацией (КД) средняя наработка на отказ за 7 лет эксплуатации $T_{КД}$. Важной задачей является приближенная оценка закона распределения генеральной совокупности по выборочным значениям параметров. Другими словами, по данным выборочного распределения, необходимо оценить неизвестные параметры теоретического распределения. Так как известны конкретные значения наработки, следует выбрать точечную оценку генеральной средней и параметра средней наработки на отказ.

Из рис. 2 видно, что средняя наработка на отказ T и у стальных, и у алюминиевых ВВТ в период эксплуатации больше, чем $T_{КД}$, а следо-

вательно, и ресурс выше, чем значение, предусмотренное КД. Однако при рассмотрении всей совокупности эксплуатируемых ВВТ у части теплообменников имеются отказы, вызванные их негерметичностью.

В качестве показателя эффективности эксплуатации ВВТ K определяется выражением

$$K = \frac{\Sigma_2}{\Sigma_1}.$$

Здесь Σ_2 — наработка до отказа вследствие негерметичности, ч; Σ_1 — фактическая наработка, ч.

В этом выражении:

$$\Sigma_2 = T_2 n_2; \quad \Sigma_1 = T_1 n_1,$$

где T_2 — средняя фактическая наработка ВВТ при условии $T < T_{КД}$, ч; T_1 — средняя фактическая наработка ВВТ при условии $T \geq T_{КД}$, ч; n_2 — количество ВВТ при условии $T < T_{КД}$, шт.; n_1 — количество ВВТ при условии $T \geq T_{КД}$, шт.

Результаты расчета показателя эффективности K в период эксплуатации ВВТ приведены в табл. 2, где в числителе указаны значения для алюминиевых теплообменников, а в знаменателе — для стальных.

Оценим вероятность отказа ВВТ вследствие негерметичности за период эксплуатации с 2010 по 2017 г. по формуле

$$Q = \frac{r(t)}{N_0},$$

где $r(t)$ — число всех отказавших изделий к моменту времени t , шт.; N_0 — общее число однотипных изделий в начале испытания или эксплуатации, шт.

В табл. 3 приведены значения рассчитанной вероятности отказа вследствие негерметичности для алюминиевых и стальных ВВТ.

Вследствие различных условий эксплуатации ВВТ оценка проведена для каждого теплообменника. Из табл. 2 и 3 следует, что по данной методике при штатных параметрах лучшие результаты показали ВВТ из стали. Таким образом, параметры K и Q показывают полноту использования ресурса теплообменников в ходе их эксплуатации, и чем меньше значения K и Q , тем больше эффективность и надежность ВВТ.

Статистические данные об отказах ВВТ в процессе эксплуатации является основным источником сведений об их надежности. От характера и точности этой информации во многом зависит правильность решений, принимаемых

Таблица 2

Значения показателя эффективности эксплуатации для алюминиевых и стальных ВВТ

Номер ВВТ	K	Номер ВВТ	K
1	0,21/–	10	0,15/–
2	0,25/–	11	0,25/–
3	0,10/–	12	0,31/–
4	–/0,11	13	0,18/–
5	–/0,10	14	–/0,11
6	–/0,12	15	–/0,07
7	–/0,22	16	0,21/–
8	–/0,28	17	–/0,09
9	–/0,18		

Таблица 3

Значения вероятности отказа вследствие негерметичности для алюминиевых и стальных ВВТ

Номер ВВТ	Q	Номер ВВТ	Q
1	0,06	10	0,15
2	0,04	11	0,25
3	0,05	12	0,31
4	0,03	13	0,18
5	0,07	14	0,11
6	0,05	15	0,15
7	0,02	16	0,21
8	0,10	17	0,09
9	0,18		

по конструктивной доводке ВВТ, изменению технологического процесса их изготовления, а также по применяемости и объективности различных видов стендовых испытаний.

Выводы

1. Выполнена вероятностная оценка безотказной работы ВВТ в период эксплуатации.
2. Установлено, что большинство отказов вызвано негерметичностью ВВТ в период эксплуатации.
3. Нарботка до отказа практически по всем рассмотренным ВВТ превышает ресурс, предусмотренный КД на изделие.
4. Использование приведенных данных позволяет обосновать возможность продления ресурса ВВТ.

Литература

- [1] Дьяченко Ю.В., Спарин В.А., Чичиндаев А.В. *Системы жизнеобеспечения летательных аппаратов*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2003. 512 с.
- [2] Архаров А.М., Кривоногов И.Н. Выбор и обоснование режимов нагружения воздуховоздушных теплообменников при проведении ускоренных ресурсных испытаний. *Труды МВТУ. Глубокий холод и кондиционирование*, 1979, № 296, 150 с.
- [3] Воронин Г.И. *Конструирование машин и агрегатов систем кондиционирования*. Москва, Машиностроение, 1978. 544 с.
- [4] Кэйс В.М., Лондон А.Л. *Компактные теплообменники*. Москва, Энергия, 1967. 224 с.
- [5] Бакулев В.И., Голубев В.А., Крылов Б.А., Марчуков Е.Ю., Нечаев Ю.Н., Онищик И.И., Сосунов В.А., Чепкин В.М. *Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок*. Москва, МАИ, 2003. 688 с.
- [6] Байгалиев Б.Е., Щелчков А.В., Яковлев А.Б. *Теплообменные аппараты*. Казань, Изд-во Казанского гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева, 2012. 180 с.
- [7] Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.А., Осипов М.И. *Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 592 с.
- [8] ГОСТ 27.002–2015. *Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения*. Москва, Изд-во Стандартиформ, 2016. 28 с.
- [9] Галимов А.Р., Меркулов В.И., Тищенко И.В. Статистический анализ отказов воздуховоздушных теплообменников системы кондиционирования воздуха авиационной техники. *Молодежный научно-технический вестник*, 2017, № 5, 7 с. URL: <http://refportal.com/upload/files/galimov.pdf> (дата обращения 15 марта 2018).
- [10] Худяков А.И. *Цилиндрический пластинчатый теплообменник*. Пат. 2364812 С1 РФ, 2009.
- [11] Григорьев А.А., Марков Ю.С., Лепешкин А.Р., Григорьев С.Н. *Пластинчатый теплообменник*. Пат. 2350874 С1 РФ, 2009.
- [12] Алфимов А.В., Ломазов В.С., Дробыш М.В. *Пластинчатый теплообменник*. Пат. 119085 U1 РФ, 2012.

References

- [1] D'yachenko Yu.V., Sparin V.A., Chichindayev A.V. *Sistemy zhizneobespecheniya letatel'nykh apparatov* [Life support systems for aircraft]. Novosibirsk, NSTU publ., 2003. 512 p.
- [2] Arkharov A.M., Krivonogov I.N. Selection and justification of air-to-air heat exchanger loading modes during accelerated service life tests. *Trudy MVTU. Glubokiy kholod i konditsionirovaniye*, 1979, no. 296, p. 150 (in Russ.).

- [3] Voronin G.I. *Konstruirovaniye mashin i agregatov sistem konditsionirovaniya* [Design of machines and units of air conditioning systems]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1978. 544 p.
- [4] Kays V.M., London A.L. *Compact Heat Exchangers*. Malabar, Fla Krieger Pub. Co., 1998. 335 p.
- [5] Bakulev V.I., Golubev V.A., Krylov B.A., Marchukov E.Yu., Nechayev Yu.N., Onishchik I.I., Sosunov V.A., Chepkin V.M. *Teoriya, raschet i proyektirovaniye aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok* [Theory, calculation and design of aircraft engines and power plants]. Moscow, MAI publ., 2003. 688 p.
- [6] Baygaliyev B.E., Shchelchkov A.V., Yakovlev A.B. *Teploobmennyye apparaty* [Heat exchanger]. Kazan, KAI publ., 2012. 180 p.
- [7] Ivanov V.L., Leont'yev A.I., Manushin E.A., Osipov M.I. *Teploobmennyye apparaty i sistemy okhlazhdeniya gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok* [Heat exchangers and cooling systems for gas turbine and combined plants]. Moscow, Bauman Press, 2004. 592 p.
- [8] *State Standard 27.002–2015. Reliability in technology (SAST). Terms and definitions*. Moscow, Standartinform publ., 2016. 28 p.
- [9] Galimov A.R., Merkulov V.I., Tishchenko I.V. Statistical analysis of failures of air-to-air heat exchangers of the air conditioning system of aviation equipment. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskyy vestnik*, 2017, no. 5, 7 p. Available at: <http://refportal.com/upload/files/galimov.pdf> (accessed 15 March 2018).
- [10] Khudyakov A.I. *Tsilindricheskyy plastinchatyy teploobmennik* [Cylindrical plate heat exchanger]. Patent RU no. 2364812 C1, 2009.
- [11] Grigor'yev A.A., Markov Yu.S., Lepeshkin A.R., Grigor'yev S.N. *Plastinchatyy teploobmennik* [Plate heat exchanger]. Patent RU no. 2350874 C1, 2009.
- [12] Alfimov A.V., Lomazov V.S., Drobysh M.V. *Plastinchatyy teploobmennik* [Plate heat exchanger]. Patent RU no. 119085 U1, 2012.

Статья поступила в редакцию 30.08.2018

Информация об авторах

ГАЛИМОВ Альмир Рашидович — помощник руководителя проектов НИОКР ПАО НПО «Наука» (125040, Москва, Российская Федерация, 3-я ул. Ямского поля, владение № 2, e-mail: almirgalimov94@gmail.com).

МЕРКУЛОВ Владислав Иванович — доктор технических наук, профессор кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vim1935@mail.ru).

ТИЩЕНКО Игорь Валерьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: igorvalti@rambler.ru).

Information about the authors

GALIMOV Almir Rashidovich — Assistant Project Manager, Scientific and Production Association PAO NPO Nauka (125040, Moscow, Russian Federation, 3rd Yamskogo Polya St., Property No. 2, e-mail: almirgalimov94@gmail.com).

MERKULOV Vladislav Ivanovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Refrigeration and Cryogenic Technology, Air Conditioning and Life Support Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vim1935@mail.ru).

TISCHENKO Igor Valerievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Refrigeration and Cryogenic Technology, Air Conditioning and Life Support Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: igorvalti@rambler.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Галимов А.Р., Меркулов В.И., Тищенко И.В. Оценка вероятности отказов воздухо-воздушных теплообменников при эксплуатации авиационных систем кондиционирования воздуха. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 11, с. 84–89, doi: 10.18698/0536-1044-2018-11-84-89

Please cite this article in English as:

Galimov A.R., Merkulov V.I., Tishchenko I.V. An Assessment of the Probability of Failure of Air-to-Air Heat Exchangers when Operating Air-Conditioning Systems. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 11, pp. 84–89 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2018-11-84-89