

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-5-74-80

УДК (UDC) 519.26

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ СТАТИСТИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭТАПЕ АНАЛИЗА ВЫБРОСОВ

© Наталья Геннадиевна Лисаченко¹, Алексей Геннадьевич Попов¹,
Александр Митрофанович Думанский^{1,2}

¹ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия;
e-mail: lisachenkong@technologiya.ru; ag-popov@yandex.ru

² Институт машиноведения им. А. А. Благодирова РАН, Москва, Россия; e-mail: dumansky@imash.ru

Статья поступила 10 ноября 2017 г.

Рассмотрены критерии для проведения экспертных оценок на этапе анализа выбросов в процедуре расчета базисов прочностных характеристик полимерных композиционных материалов (ПКМ). Вычисленные на основе статистики величины А- и В-базиса являются нижними границами 95 %-го доверительного интервала первого и десятого процентилей распределения характеристики соответственно. В базисах отражены не только взаимосвязи средних значений и величин разброса, но и параметры выборки, на основе которой они были рассчитаны, такие как размер выборки, вид аппроксимирующего распределения, степень однородности данных. На этапах проверки гипотез в оригинальном алгоритме расчета базисов, кроме статистических тестов, предусмотрено проведение экспертной оценки, а также предложен ряд критериев для каждого из этапов. Показана целесообразность применения дополнительных критериев, способствующих принятию обоснованных решений, позволяющих повысить надежность конструкций из ПКМ. Подробно рассмотрен пример использования процедуры принятия решений при анализе выбросов для результатов испытаний образцов углепластика на прочность межслоевого сдвига, полученных при входном контроле препрега HexPly, где максимальное значение прочности одного из пяти образцов одной из семи партий препрега оказалось статистическим выбросом для объединенной совокупности данных. Приведены рекомендации по экспертному оцениванию трех основных и четырех дополнительных критериев. Наряду с исследованием однородности данных и вида аппроксимирующего распределения процедура анализа выбросов успешно используется на этапе разведочного анализа данных, а также при контроле качества процесса изготовления и испытания материалов.

Ключевые слова: экспертная оценка; принятие решений; полимерные композиционные материалы; анализ выбросов; А- и В-базис.

DECISION-MAKING IN CALCULATION OF THE STATISTICALLY VALID PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS AT THE STAGE OF OUTLIER ANALYSIS

© Natalia G. Lisachenko¹, Aleksei G. Popov¹, Aleksandr M. Dumanskii^{1,2}

¹ A. G. Romashin ORPE Technologiya, Obninsk, Russia; e-mail: lisachenkong@technologiaya.ru; ag-popov@yandex.ru

² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: dumansky@imash.ru

Submitted November 10, 2017.

Criteria for conducting expert estimates at the stage of outlier identification in the procedure of A- and B-basis calculation of the strength characteristics of the polymeric composite materials (PCM) are considered. Statistically-valid A- and B-basis values are lower bounds of 95%-confidence interval of the first and tenth percentile of the characteristic distribution, respectively. Basis values reflect not only the interrelation of mean and variance, but also parameters of the sample they were calculated from: sample size, probability distribution type, compatibility of data. At the steps of testing the hypotheses carrying out expert assessment is provided of in an original algorithm of bases calculation, and a number of criteria for each of steps is also offered. Practicability of application of the additional criteria promoting making the reasonable decisions allowing to increase reliability of designs from PCM is shown. An example of use of the procedure of decision-making is in detail reviewed in the analysis of results of interlaminar shear strength testing received at incoming inspection of HexPly prepreg; the maximum

shear strength value of one from five specimens of one from seven batches of a prepreg was statistical outlier for the pooling data set. Recommendations about expert estimation of three basic and four additional criteria are provided. Along with a research of compatibility of data and approximating distribution type, the procedure of outlier analysis is successfully used at a stage of the exploratory data analysis, and also at quality control of material fabrication and testing process.

Keywords: expert estimate; decision-making; polymer composite materials; outlier; A- and B-basis

Российский свод требований для обеспечения безопасности полетов — Авиационные правила (АП) [1] — регламентирует статистическое представление прочностных характеристик материалов, во многом определяющее безопасность и надежность воздушного судна. Согласно АП расчетные характеристики материалов должны определяться на основе статистики, обеспечивая прочность с вероятностью 99 или 90 % с 95 %-ным доверительным интервалом в зависимости от роли конкретного элемента в конструкции. Фактически требуемые значения представляют собой нижнюю границу 95 %-го доверительного интервала первого и 10-го процентилей распределения, т.е. тех значений, выше которых находятся 99 и 90 % всех значений прочности соответственно. Данные характеристики известны как «допустимые уровни А и В» [2] или «базисы А и В» [3]. Подробный алгоритм их расчета приведен в СМН-17 [4].

Использование в прочностных расчетах значений базисов вместо средних значений характеристик позволяет достичь требуемой надежности без использования коэффициентов безопасности. Детерминированные коэффициенты безопасности для изделий из композиционных материалов достаточно высоки, поскольку учитывают их повышенную по сравнению с металлами и сплавами неоднородность свойств и большой разброс значений. Статистико-вероятностный подход позволяет обойтись без повышенных коэффициентов для материалов высокого качества, имеющих хорошую повторяемость свойств и низкий разброс их значений, что может существенно снизить массу воздушного судна.

Расчет значений базисов включает в себя такие статистические процедуры, как анализ выбросов, анализ однородности данных и вида распределения. Полностью автоматизировать его не представляется возможным, так как на каждом этапе проверки статистической гипотезы окончательное решение принимается на основании экспертной оценки. Для каждого из этапов в [4] предлагается рассмотреть ряд вопросов в теории принятия решений, называемых «критериями». Они носят рекомендательный характер, кроме того, в них не конкретизируются виды прочностных характеристик, условия проведения испытаний и особенности испытываемых материалов.

Опыт расчета базисов прочностных характеристик ПКМ показал необходимость расширения набора рассматриваемых критериев и формулировки практических рекомендаций по работе с каждым из них.

Процедура расчета значений базисов

Статистически обоснованные характеристики — результат представления свойств материала в виде случайной переменной, т.е. величины, меняющейся от образца к образцу по заранее неизвестному закону. Статистически обоснованным значением В-базиса является статистика, вычисленная на основании случайной выборки значений характеристики, которая с 95 %-й вероятностью не превышает десятого процентиля искомого распределения, т.е. является нижней границей 95 %-го доверительного интервала десятого процентиля. Значение А-базиса — нижняя граница 95 %-го доверительного интервала первого процентиля (рис. 1).

Схема процедуры расчета базисов приведена на рис. 2. Входные данные представляют собой результаты измерения изучаемой характеристики для нескольких партий. На первом этапе результаты испытаний образцов каждой партии проверяются на наличие статистических выбросов. Далее для определения возможности объединения данных различных партий в одну совокупность проверяется значимость различий между группами данных. В случае структурированных (неоднородных) данных расчет базисов проводится с помощью дисперсионного анализа, неструктурированные (однородные) данные объединяются в одну совокупность. Для объединенных данных проводится повторная проверка на выбросы на этот раз объединенной совокупности. Далее следует проверка гипотез о виде распределения. По наблюдаемому уровню значимости статистических критериев согласия выбирается подходящий вид распределения. Распределение прочности может быть нормальным, логнормальным или двухпараметрическим распределением Вейбулла [4]. Процедура расчета базисов зависит от выбранного вида распределения. В случае когда вид распределения остался неопределенным, базисы рассчитываются непараметрически.

В [4] приведены следующие рекомендации по процессу «суждения».

1. Если выброс, обнаруженный в одной из партий, оказывается в диапазоне невыбросов других партий, его следует сохранить.

2. Когда возможно провести повторные испытания на образцах той же панели, получают результаты, которые могут заменить или дополнить данные, содержащие выброс.

3. Выброс, являющийся максимальным значением и находящийся за известными и/или теоретически рассчитанными характеристиками материала, имеет смысл отбросить.

Наблюдаются ситуации, когда ни одна из трех приведенных рекомендаций не позволяет принять решение. Например, выброс был обнаружен в объединенной совокупности (а не в отдельной партии), при этом результаты повторных испытаний недоступны и выброс не является максимальным значением. В таком случае результат суждения окажется абсолютно субъективным. В данной работе предложены еще четыре рекомендации, которые по усмотрению экспертов можно использовать как дополнительные (в случае неопределенности), так и наравне с первыми тремя, поскольку накопленный опыт обработки результатов испытаний доказал их значимость и информативность. Перечислим их.

4. Низкий разброс значений партии или объединенной совокупности с учетом выброса является аргументом в пользу его сохранения, так как результат статистического теста может быть объяснен скученностью остальных значений.

5. Поскольку статистический критерий *MNR* не позволяет вычислить наблюдаемый уровень значимости, следует проверить выброс на других (пониженных и повышенных) уровнях значимости, тем самым оценив степень его критичности.

6. Целесообразен анализ влияния выброса на однородность данных и вид распределения. Если с учетом выброса совокупность данных получается существенно однороднее и/или наблюдаемый уровень значимости аппроксимирующего распределения существенно выше, чем без выброса, то имеет смысл его сохранить.

К настоящему времени достаточно убедительно показано, что непараметрические методы, в том числе и методы идентификации выбросов, имеют не меньшую мощность, чем параметрические, но при этом являются более обоснованными, так как не исходят из предположения, что распределение результатов испытаний относится к определенному виду [5]. Кроме того, параметрические методы отбраковки резко выделяющихся наблюдений крайне неустойчивы к отклонению от нормальности [6].

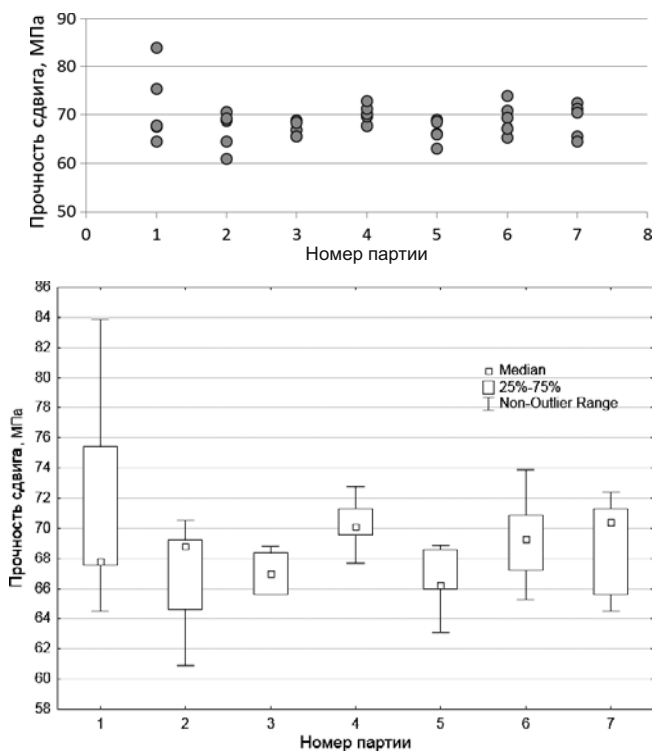


Рис. 3. Диаграмма рассеяния и диаграмма «ящички-усы» для визуальной оценки выброса

Таким образом, непараметрические тесты, устойчивые к отклонениям от нормального распределения, могут подтвердить или опровергнуть результаты теста *MNR* и/или визуальной оценки.

Ниже приведен анализ результатов испытаний образцов на прочность при межслоевом сдвиге при 120 °С (согласно EN 2563:1997), полученных при входном контроле препрега HexPly на основе однонаправленной углеродной ленты, пропитанной эпоксидным связующим. В табл. 1 приведены результаты испытаний семи партий препрега по пять образцов в каждой.

Максимальное значение прочности образцов первой партии 83,9 МПа является статистическим выбросом в объединенной совокупности данных ($MNR = 3,73 > 2,98 = C_{35, 0,05}$), не являясь при этом статистическим выбросом внутри первой партии ($MNR = 1,54 < 1,72 = C_{5, 0,05}$). Значения *B*-базиса с учетом и без учета выброса составляют 61,6 и 62,7 МПа соответственно. Можно заметить, что при исключении из расчетов максимального наблюдения значение базиса (в отличие от среднего) повысилось, что объясняется значимым уменьшением коэффициента вариации.

Для визуальной оценки выброса удобно использовать диаграмму рассеяния и/или диаграмму «ящички-усы» (рис. 3). Для оценки степени

разброса значений одну из диаграмм желательно построить в координатах, начинающихся с нуля.

Рассмотрим заключения, полученные при проведении экспертной оценки:

1. Расчет статистики MNR показывает, что величина 83,9 МПа является статистическим выбросом для трех партий из семи (см. табл. 1, партии 3, 4, 5).

2. Проведение повторных испытаний оказалось невозможным.

3. В последних пяти поставках в результатах испытаний не встречалось ни одного значения выше 80 МПа.

4. Коэффициент вариации объединенной совокупности данных составляет 6 %.

5. Анализируемое значение является выбросом в объединенной совокупности и на пониженном уровне значимости 0,01 ($MNR = 3,73 > 3,32 = C_{35, 0,01}$).

6. Выброс не оказывает значимого влияния на однородность данных, но существенно влияет на пригодность аппроксимирующих распределений: наблюдаемые уровни значимости для всех распределений без выброса существенно выше, чем с выбросом (табл. 2).

Использовали непараметрический MAD -тест для выборок небольшого размера, основанный на вычислении медианы абсолютных отклонений. Тестовая статистика

$$MAD = \frac{|x_B - m(x_i)|}{m(|x_i - m(x_i)|)}, \quad (3)$$

где x_B — проверяемое значение; $m(x_i)$ — медиана исходных данных; знаменатель — медиана абсолютных отклонений. В MAD -тесте выбросом считается значение, для которого тестовая статистика превышает число пять. Для рассматриваемой совокупности величин $MAD = 6,4 > 5$.

Процедура принятия решений

Расчет базисов проводится как для материалов, прочностные свойства которых известны

или могут быть рассчитаны, так и для материалов, испытываемых впервые. Вес и приоритет каждого из критериев устанавливается экспертом или группой экспертов для каждого материала и вида испытаний на начальной стадии процесса принятия решения — обычно до начала проведения испытаний. На заключительной стадии решение о каждом конкретном случае принимает один человек, в теории экспертных оценок называемый «лицом, принимающим решение» — ЛПР [7].

Эксперты (или эксперт) должны иметь информацию о материале, такую как последовательность укладки слоев, виды испытаний, условия проведения испытаний, а также информацию о предыдущем опыте испытаний данного или схожего с ним материала (средние и максимальные значения, характерная величина разброса, показатели стабильности характеристик). Для каждой из проблем (выбросы, однородность, вид распределения) эксперты выделяют ключевые критерии и разрабатывают шкалы, в которых ЛПР предстоит оценить каждый из критериев.

Поскольку совокупность возможных вариантов решения проблемы представляет собой две альтернативы — «да» или «нет», шкалу выбирают так, чтобы мнение в пользу альтернативы «да» оценивалось положительным числом, а «нет» — отрицательным. При превышении некоторыми «приоритетными» критериями оценки выше или ниже «критической» остальные критерии могут не рассматриваться. Приоритетные критерии и их критические значения также устанавливают эксперты.

От решения экспертов зависит, насколько субъективным будет результат работы ЛПР. Есть возможность максимально минимизировать субъективность (вместо ЛПР окончательное решение будет вычислено компьютерным приложением), однако опыт работы с алгоритмом показывает, что такой подход желательно использовать только для характеристик материала, которые уже были получены ранее в достаточном объеме (на-

Таблица 1. Результаты входного контроля препрега HexPly

Результаты испытаний	Номер партии						
	1	2	3	4	5	6	7
Точечные значения прочности образцов в партии, МПа	83,9	68,8	68,8	67,7	66,2	65,3	72,4
	67,6	64,6	67,0	69,6	66,0	70,9	65,6
	67,8	70,5	65,6	70,1	63,1	69,3	71,3
	75,4	69,2	68,4	71,3	68,9	67,2	70,4
	64,5	60,9	65,6	72,8	68,6	73,9	64,5
Среднее значение, МПа	71,8	66,8	67,1	70,3	66,6	69,3	68,8
Коэффициент вариации, %	10,9	5,9	2,2	2,7	3,5	4,8	5,2

пример, результаты периодического входного контроля), при условии, что мнения экспертов по каждому из критериев оказываются согласованными [7].

Итак, в процессе экспертного оценивания процедуры анализа выбросов экспертам необходимо рассмотреть следующие вопросы:

- 1) межпартийный анализ;
- 2) повторные испытания;
- 3) завышенный результат;
- 4) низкий разброс значений;
- 5) уровень значимости критерия *MNR*;
- 6) однородность и нормальность данных;
- 7) результаты непараметрических тестов.

Проверка условия, является ли выброс в одной из партий статистическим выбросом для других партий, а также для всей совокупности, запрограммирована и легко осуществима ЛПР; эксперты предварительно решают, как будет учитываться этот критерий. В случае доступности повторных испытаний следует решить, как именно учитывать их результаты. Следует определить, какое значение можно считать результатом, превышающим возможные показатели материала, либо посчитать, что оно неизвестно. Эксперты могут исключить данный критерий из рассмотрения, как и любой другой. Опираясь на знания о материале и исследуемой характеристике, следует установить, какой разброс значений считается низким. Данному критерию можно назначить приоритет: если наблюдается вариация ниже определенного значения, статистический выброс не удаляется. Программа, используемая ЛПР, рассчитывает критические значения критерия *MNR* на повышенных и пониженных уровнях значимости (0,10, 0,025 и 0,01), кроме основного 0,05. Это позволяет указать интервал, в котором лежит наблюдаемый уровень значимости критерия *MNR*. В шестом вопросе предстоит решить, как оценивать влияние выброса на однородность данных и вид распределения. В заключение следует назначить вес каждому из критериев.

ЛПР оценивает каждый из критериев по предложенной экспертами шкале и рассчитывает интегральный показатель качества как сумму произведений оценок на веса. Если результат окажется отрицательным, значение считается выбросом, который удаляется из дальнейших расчетов.

Приведем результат экспертного решения по процедуре анализа выбросов для испытаний на межслоевой сдвиг при повышенной температуре высокопрочного препрега HexPly. В ходе обсуждения приоритетными были выбраны следующие критерии:

критическим значением вариации на основании опыта аналогичных испытаний принято значение 4 %, т.е. вариация ниже 4 % как внутри одной партии, так и в объединенной совокупности позволяет сохранить выброс без рассмотрения других критериев;

если сохранение или удаление выброса приводит к существенному с точки зрения ЛПР улучшению картины однородности и/или нормальности данных, данное решение признано критическим и остальные критерии могут не рассматриваться.

Для выброса, наблюдающегося внутри одной из партий, предложено к интегральному показателю прибавлять один балл за каждую партию, для которой данное значение не является статистическим выбросом, и вычитать из него по одному баллу за оставшиеся партии. Когда доступны результаты повторных испытаний, добавление или замена ими первичных испытаний происходит по усмотрению ЛПР. В том случае когда значение прочности превышает 80 МПа, вычитается один балл, 85 МПа — три балла. Если значение коэффициента вариации не превышает 5 %, прибавляется два балла. Для выброса по визуальной оценке, являющегося статистическим выбросом на уровне значимости 10 %, вычитается один балл. Для статистического выброса на уровне значимости 5 % вычитается один балл, если значение оказывается выбросом на уровне значимости 2,5 %, и два балла для уровня значимости 1 %. Значимость влияния на однородность данных и степень согласия с нормальным распределением определяет ЛПР по шкале от -3 до +3, где отрицательные значения соответствуют ситуации, когда после удаления выброса данные становятся однороднее и/или нормальнее, а положительные — обратной ситуации. По результатам непараметрического теста к интегральному показателю прибавляется величина, равная разности критического значения 5 и округленной до целого величины статистики *MAD*, вычисленной по формуле (3). Принято решение, что все критерии имеют одинаковый вес.

Для анализа данных из табл. 1 процедура принятия решения может оказаться короткой,

Таблица 2. Анализ уровня значимости аппроксимирующих распределений

Проверяемый вид распределения	Наблюдаемый уровень значимости критерия Андерсона – Дарлинга	
	с выбросом	без выброса
Нормальное	0,07	0,79
Вейбулла	0,000	0,26
Логнормальное	0,18	0,79

Таблица 3. Пример расчета интегрального показателя

Номер критерия	1	2	3	4	5	6	7	Итого
Баллы	+1	—	-1	0	-2	-3	-1	-6

если ЛПР посчитает, что результаты, представленные в табл. 2, позволяют удалить выброс согласно приоритетному заключению 6. Возможный расчет интегрального показателя на основе приведенных выше критериев и экспертных решений представлен в табл. 3. По результатам данного расчета выброс следует удалить из рассмотрения. Видно, что один из первых трех критериев, предложенных авторами алгоритма, оказался недоступен (результаты повторных испытаний), а два других в сумме дают ноль, т.е. неопределенность. Применение же дополнительных рекомендаций (с 4 по 7) позволило достичь обоснованного решения.

Таким образом, предложенные в работе критерии позволяют с высокой степенью достоверности обосновать принятое решение. Может показаться, что использование большего количества критериев усложняет работу экспертов, но следует иметь в виду, что всесторонний анализ выбросов способствует лучшему пониманию их природы, в то время как основная цель процедуры экспертного оценивания — с большей достоверностью определить, был ли выброс результатом свойственных материалу разбросов значений или ошибкой, причину которой не удалось обнаружить.

Предложенные процедуры анализа выбросов, а также анализа однородности данных и видов распределений могут быть использованы на этапе разведочного анализа данных, который в обязательном порядке предшествует применению современных методов прикладной статистики, и при контроле качества процесса изготовления и испытания материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авиационные правила. Ч. 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. — М.: Авиаиздат, 2009. — 267 с.

2. Композиционные материалы. Т. 8. Ч. 2. / Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока / Анализ и проектирование конструкций (редактор тома К. Чамис). — М.: Машиностроение, 1978. — 264 с.
3. DOT/FAA/AR-03/19. Final Report. "Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material System: Updated Procedure" Office of Aviation Research, Washington, D.C. 20591, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, September, 2003.
4. Composite Materials Handbook – 17 (CMH-17). SAE International on behalf of CMH-17, Wichita State University, March 2012 — Chapter 8 Statistical Methods.
5. Орлов А. И. Структура непараметрической статистики / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 7. С. 62 – 72.
6. Орлов А. И. Неустойчивость параметрических методов отбраковки резко выделяющихся наблюдений / Заводская лаборатория. 1992. Т. 58. № 7. С. 40 – 42.
7. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование: учебник в 3-х ч. Ч. 2. Экспертные оценки. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 486 с.

REFERENCES

1. Aviation rules. Part 25. Airworthiness standards: Transport category airplanes. — Moscow: Aviaizdat, 2009. — 267 p. [in Russian].
2. Composite materials. Vol. 8. Part 2. / Ed. by L. Brautman and R. Crock / Analysis and design of structures (volume editor K. Casita Chamisa). — Moscow: Mashinostroenie, 1978. — 264 p. [in Russian].
3. DOT/FAA/AR-03/19. Final Report. "Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material System: Updated Procedure" Office of Aviation Research, Washington, D.C. 20591, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, September, 2003.
4. Composite Materials Handbook – 17 (CMH-17). SAE International on behalf of CMH-17, Wichita State University, March 2012 — Chapter 8 Statistical Methods.
5. Orlov A. I. Structure of Nonparametric Statistics (generalizing paper) / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 7. P. 62 – 72 [in Russian].
6. Orlov A. I. Instability of parametric methods of rejection outlying observation / Zavodskaya laboratoriya. 1992. Vol. 58. N 7. P. 40 – 42 [in Russian].
7. Orlov A. I. Organizational-economic modeling: the textbook. Part 2. Expert estimates. — Moscow: Izd. MGTU im. N. E. Bauman, 2011. — 486 p. [in Russian].