

УДК 621.438-226.2:539.376:539.4

Б. Е. В а с и л ь е в

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ПРИ РАБОТЕ ЛОПАТОК ТУРБИН НА НЕСКОЛЬКИХ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ

Для лопатки газовой турбины, выполненной из жаропрочного никелевого сплава, при циклически изменяющемся режиме работы определены кинетика напряженно-деформированного состояния и запасы длительной прочности. Предложена альтернативная методика определения действующих эквивалентных напряжений и эквивалентного предела длительной прочности материала лопатки, а также соответствующих местных запасов длительной статической прочности.

E-mail: b_vasilyev@ciam.ru

Ключевые слова: лопатка турбины, ползучесть, эквивалентный запас.

Лопатки турбин газотурбинных двигателей работают длительное время при высоких нагрузках в условиях неравномерного нагрева и циклического нагружения. При высоких температурах с течением времени свойства материалов, из которых изготовлены лопатки турбин, изменяются вследствие ползучести.

Современные расчетные модели, в том числе конечно-элементные, позволяют выполнять расчеты, используя физически нелинейные свойства материала, в том числе ползучесть.

В настоящее время расчет повреждаемостей лопаток турбин проводится на каждом отдельном режиме цикла за весь ресурс. Однако при работе на разных режимах цикла накопление повреждаемостей зависит от истории нагружения.

В настоящей работе предложены подходы к расчету долговечности лопатки в условиях модельного циклического нагружения. Выполнены сравнительные расчетные исследования влияния свойств ползучести сплава на долговечность лопатки по существующей и предлагаемым методикам.

Математическая модель лопатки и условия работы. Для выявления зависимости напряженно-деформированного состояния (НДС) и длительной статической прочности от характера нагружения лопатки турбины при циклически изменяющихся условиях работы исследовано поведение НДС в условиях цикла “минимал–максимал–минимал” на примере сечения охлаждаемой лопатки турбины (рис. 1).

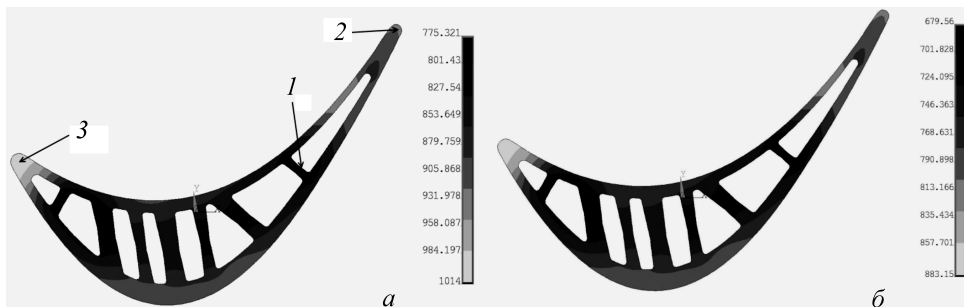


Рис. 1. Температурное состояние на режиме “максимал” (а) и “минимал” (б):
 1 — последняя перегородка T_{\min} ; 2 — выходная кромка; 3 — входная кромка с максимальной температурой

Лопатка выполнена из жаропрочного сплава на никелевой основе. Свойства материала считались изотропными.

Для расчета кинетики НДС использовали уравнение теории упрочнения [1, 2]:

$$\frac{d\varepsilon_{cr}}{d\tau} = C_1 \sigma^{C_2} \varepsilon_{cr}^{C_3} e^{\frac{-C_4}{T}},$$

где ε_{cr} — деформация ползучести; σ — напряжение; T — температура; τ — время; $C_1 \dots C_4$ — постоянные материала.

Для охлаждаемых лопаток современных турбин характерно сложное НДС, поэтому в настоящей работе рассмотрены эквивалентные напряжения и деформации по Мизесу:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}};$$

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}{2}}.$$

Задача определения кинетики обобщенного плоско-деформированного состояния сечения лопатки решена с помощью КЭ комплекса ANSYS. Используемый тип элемента — Plane183.

Методы расчета кинетики НДС и определения запасов длительной статической прочности в условиях циклического нагружения. Расчеты кинетики НДС и статической прочности выполнены тремя методами.

Метод I — традиционный [3], при котором каждый режим работы лопатки турбины рассчитывается по отдельности, запасы длительной статической прочности на одном режиме вычисляются по эквивалентным напряжениям, а при работе на двух режимах — линейным суммированием повреждаемостей за каждый режим.

Метод II — прямой, при котором расчет изменения НДС проводится непосредственно в процессе циклического нагружения на каждом режиме цикла непрерывно до исчерпания всех 2000 циклов, т.е. на

каждом шаге учитывается НДС предыдущего шага — история нагружения. Определяется эквивалентное напряжение за весь ресурс, запасы длительной прочности вычисляются по эквивалентному пределу длительной статической прочности материала, который определяется в соответствии с циклом нагружения.

Метод III — смешанный, при котором расчет изменения НДС выполняется так же, как и в методе II, а затем из общей картины изменения напряжений выделяются кривые каждого режима за весь ресурс, определяются эквивалентные напряжения, запасы прочности, а затем их суммируют, как указано в методе I.

Для трех характерных зон лопатки (см. рис. 1) были определены запасы длительной статической прочности по методу I и по предложенным в настоящей работе для оценки влияния цикличности методам II и III.

Расчет релаксации НДС в течение какого-либо времени работы на каждом режиме выполняется следующим образом [1]. Весь интервал времени работы на режиме за весь ресурс разбивается на N интервалов, на каждом из которых рассчитывается НДС, изменяющееся вследствие ползучести конструкционного материала лопатки. В результате расчета для каждой зоны (точки) получаются кривые релаксации, по которым определяются эквивалентные напряжения за все время работы на режиме, т.е. такие условные напряжения, которые постоянно действуют в течение всего рассматриваемого интервала времени τ_Σ и приводят к повреждаемости, равной повреждаемости, полученной за то же время истинными изменяющимися во времени напряжениями.

Эквивалентные для всего рассматриваемого интервала времени напряжения σ_m вычисляются по формуле [3]

$$\sigma_m = \sqrt[m]{\frac{1}{\tau_\Sigma} \int_0^{\tau_\Sigma} \sigma^m(\tau) d\tau} = \sqrt[m]{\frac{\sum_i^N (\sigma_{\text{ср}_i}^m \Delta\tau_i)}{\tau_\Sigma}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{ср}_i}$ — напряжение на каждом i -м интервале времени $\Delta\tau_i$; m — показатель степени кривой длительной прочности сплава.

Запас по длительной статической прочности K_m или повреждаемость D_m определяются по формулам [3]:

$$K_m = \frac{\sigma_{\text{дл}}}{\sigma_m}, \quad D_m = \frac{1}{K_m}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{дл}}$ — предел длительной статической прочности материала.

При работе на нескольких режимах местный эквивалентный запас, согласно гипотезе линейного суммирования повреждаемостей, накоп-

ливаемых в процессе работы на режиме, определяется по формуле

$$\frac{1}{K_m^{\text{ЭКВ}}} = \sqrt[m]{\sum_i^N \left(\frac{1}{K_m}\right)^m}. \quad (3)$$

Исследование НДС и прочности в течение одного цикла. Тепловое состояние сечения лопатки для двух режимов приведено на рис. 1. Параметры цикла приведены в табл. 1. Рассматривается работа лопатки в течение 2000 циклов.

Таблица 1

Параметры режимов

Режим	Продолжительность режима в течение одного цикла, ч	Суммарная продолжительность за ресурс, ч	Центробежная нагрузка, Н	Номинальное напряжение, МПа
“максимал”	0,083	166,7	83510	430,1
“минимал”	5	10000	62000	319,4

Метод I – традиционный. На рис. 2 для режимов “максимал” и “минимал” показано НДС в начале и конце работы на каждом из режимов; на рис. 3 – изменение деформаций в течение работы в исследуемых зонах лопатки. В табл. 2 и 3 приведены результаты расчета местных запасов длительной статической прочности для каждого ре-

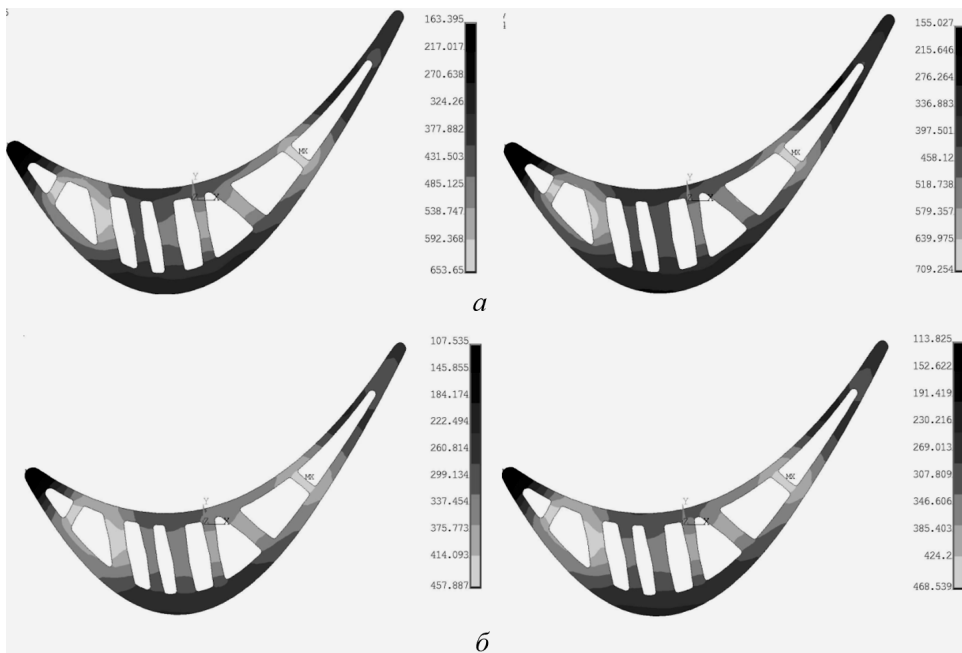


Рис. 2. Напряжения в начале (слева) и конце (справа) работы на режимах “максимал” (а) и “минимал” (б)

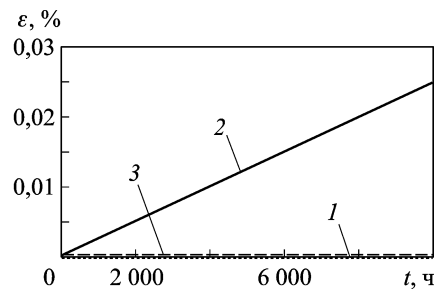
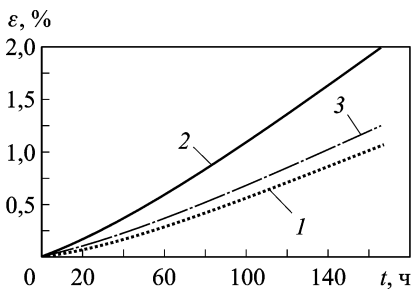


Рис. 3. Изменение деформаций в исследуемых зонах лопатки на режиме “максимал” (а) и “минимал” (б) (1, 2, 3 – см. рис. 1)

жима. Значения эквивалентных запасов за два режима для зон 1, 2 и 3 следующие: $K_m^{ЭКВ} = 1,124; 1,112$ и $1,202$ соответственно.

Таблица 2

Результаты расчета на режиме “максимал”

Зона лопатки	$T, ^\circ\text{C}$	m	$\sigma_0,$	$\sigma_{end},$	$\sigma_{ЭКВ},$	K_m
			МПа			
1	775,8	18,19	652,60	707,60	691,57	1,125
2	926,8	6,05	348,50	320,70	328,08	1,113
3	1014	5,27	164,10	155,30	165,19	1,203

Таблица 3

Результаты расчета на режиме “минимал”

Зона лопатки	$T, ^\circ\text{C}$	m	$\sigma_0,$	$\sigma_{end},$	$\sigma_{ЭКВ},$	K_m
			МПа			
1	680,0	28,78	456,8	467,4	462,51	1,782
2	809,3	14,06	262,30	256,90	259,45	1,723
3	883,2	7,73	108,10	114,50	111,46	2,346

Расчет циклически изменяющихся режимов нагружения. Изменение напряжений в процессе циклического нагружения (2000 циклов) в исследуемых зонах лопатки показано на рис. 4.

Метод III – смешанный. Для расчета эквивалентных напряжений из всего набора напряжений, полученных прямым расчетом 2000 циклов, как и ранее, выделяются напряжения, соответствующие каждому режиму.

На рис. 5 штриховыми кривыми показаны условные линии изменения напряжений для этих режимов и для сравнения сплошными – изменения напряжений, рассчитанные по методу I.

В табл. 4 приведены значения запасов длительной статической прочности, определенные по найденным эквивалентным напряжениям

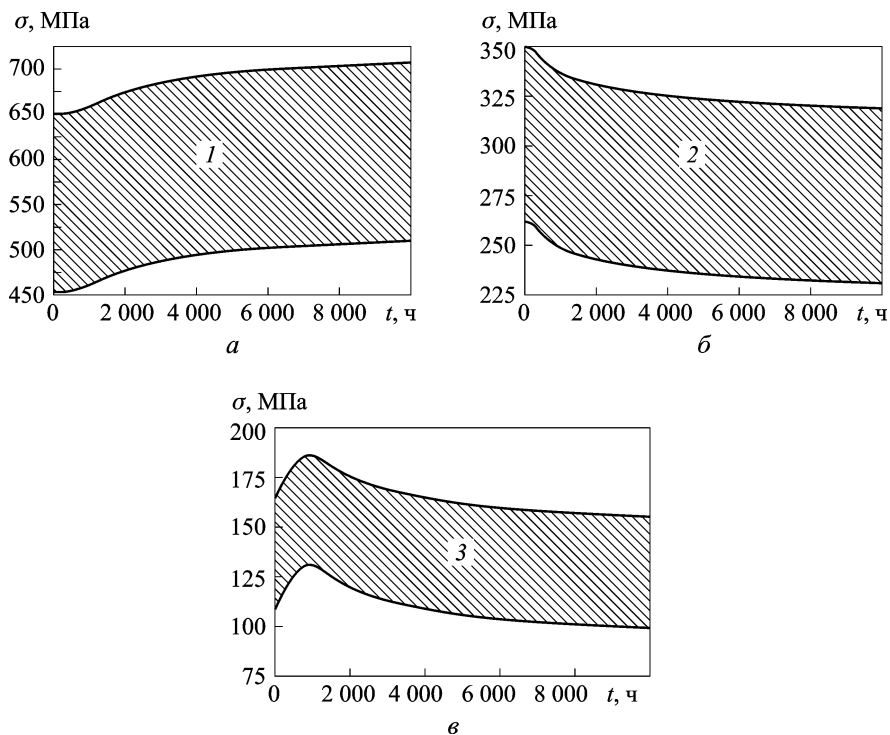


Рис. 4. Изменение напряжения в зонах 1 (а), 2 (б) и 3 (в) лопатки в процессе циклического нагружения

методом III линейным суммированием повреждаемостей, а в табл. 5 — результаты расчета запасов, выполненные разными методами.

Таблица 4

Запасы длительной статической прочности (Метод III)

Зона лопатки	Режим	$T, ^\circ\text{C}$	m	$\sigma_m^{\text{ЭКВ}}$	K_m	$K_m^{\text{ЭКВ}}$
1	“максимал”	775,8	18,19	691,6	1,125	1,125
	“минимал”	680,0	28,78	500	1,648	
2	“максимал”	926,8	6,05	328,1	1,113	1,112
	“минимал”	809,3	14,06	240,3	1,860	
3	“максимал”	1014	5,27	162,2	1,203	1,202
	“минимал”	883,2	7,73	113,1	2,313	

При определении эквивалентных напряжений и запасов длительной статической прочности (1)–(3) используется показатель степени длительной прочности материала, значение которого определяется по формуле (4) в заданном интервале времени ($\Delta T = \tau_1 - \tau_2$) и при фикс-

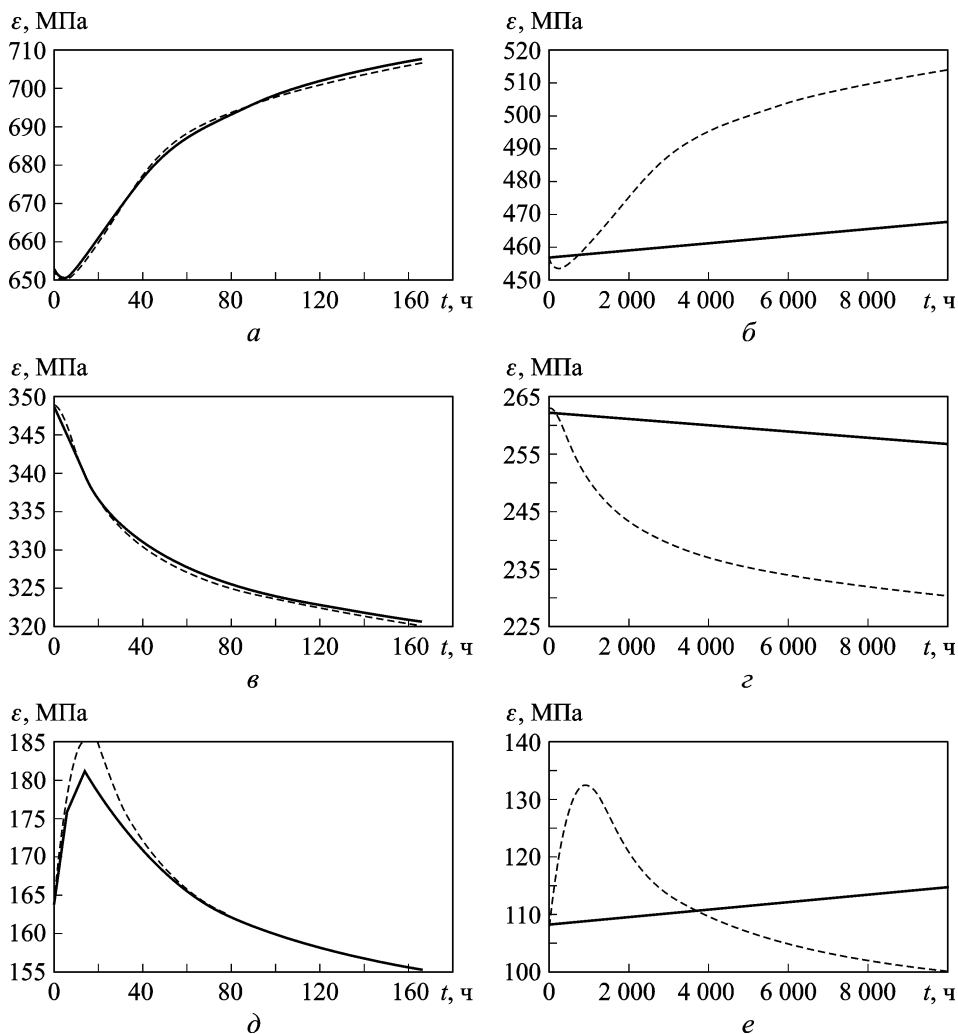


Рис. 5. Изменение напряжения в зонах 1 (а, б), 2 (в, г) и 3 (д, е) лопатки для режима “максимал” (а, в, д) и “минимал” (б, г, е)

сированных температурах:

$$m = \frac{\log \frac{\tau_2}{\tau_1}}{\log \frac{\sigma_1}{\sigma_2}}, \quad (4)$$

где σ_1 и σ_2 соответствуют времени τ_2 и τ_1 . Обычно этот интервал выбирается вблизи реального времени работы на каждом стационарном режиме. Но при пошаговом расчете релаксации напряжений этот параметр правильно выбрать затруднительно.

Его значение зависит от выбранного интервала времени. В качестве примера в табл. 6 приведены значения показателя степени длительной прочности, определенные на разных интервалах времени для двух актуальных температур.

Запасы длительной статической прочности по методам I, II, III

Зона лопатки	Метод		
	I	II	III
1	1,124	1248	1,125
2	1,112	1294	1,112
3	1,202	1528	1,202

Таблица 6

Значения показателя степени

T, °C	$\tau_1 - \tau_2$, ч		
	0,083–5	5–10	100–1000
775,8	30,2	23,1	14,8
9268	1215	855	661

Для использования прямого метода II при циклически изменяющемся температурном состоянии предложен альтернативный способ определения предела длительной прочности материала.

Для этого находили значение эквивалентного предела длительной прочности $\sigma_{дл}^{эКВ}$, изменяющегося в термоцикле в соответствии с длительностью каждого режима на протяжении всего ресурса. Формула для его определения аналогична формуле для определения эквивалентного действующего напряжения $\sigma_m^{эКВ}$ без учета параметра m :

$$\sigma_m^{эКВ} = \frac{1}{\tau_{\Sigma}} \int_0^{\tau_{\Sigma}} \sigma(\tau) d\tau, \quad (5)$$

$$\sigma_{дл}^{эКВ} = \frac{1}{\tau_{\Sigma}} \int_0^{\tau_{\Sigma}} \sigma_{дл}(\tau) d\tau.$$

В табл. 7 приведены результаты расчета эквивалентных напряжений, предела длительной прочности и запаса длительной статической прочности этим методом для трех зон лопатки.

Таблица 7

Результаты расчета прямым методом II

Зона лопатки	$\sigma_m^{эКВ}$	$\sigma_{дл}^{эКВ}$	$K_m^{эКВ}$
1	590,8	737,6	1,248
2	282,9	366,0	1,294
3	137,6	210,2	1,528

В табл. 8 приведены значения накопленных деформаций ползучести, определенные методами I, II и III. Самая большая разность значений деформаций, накопленных за 2000 циклов, полученных различными методами, не превышает 4 % (в самой нагретой зоне лопатки).

Таблица 8

Накопленные деформации ползучести, %, (методы I, II, III)

Зона лопатки	Метод I			Метод II, III
	“минимал”	“максимал”	Сумма	Цикл
1	0	1,085	1,085	1,067
2	0	2,012	2,037	1,972
3	0	1,257	1,258	1,236

Сравнивая результаты расчета запасов длительной статической прочности при различных методах расчета, можно отметить, что для рассмотренного примера различия в значениях запасов длительной статической прочности, вычисленных названными способами, практически не отличаются друг от друга.

Заключение. На примере лопатки турбины, изготовленной из жаропрочного никелевого сплава, исследована кинетика НДС при циклически меняющемся режиме работы.

Проведено сравнение результатов традиционного метода вычисления эквивалентных напряжений и местных запасов длительной статической прочности в выбранных характерных зонах среднего сечения лопатки с результатами, полученными при использовании предложенных методов — прямого и смешанного.

Предложен альтернативный способ определения значений действующих эквивалентных напряжений и эквивалентного предела длительной прочности материала, а также соответствующих местных запасов длительной статической прочности, реализующихся при термоциклировании.

В результате выявили, что прямой метод, при котором учитывается история циклического нагружения, дает картину изменения НДС, практически не отличающуюся от традиционного метода, при котором проводятся вычисления для каждого режима отдельно со своим временем наработки за ресурс (история циклического нагружения не учитывается). Поэтому допустимо применять традиционную методику определения эквивалентных запасов. Однако случай двух режимов с сопоставимой повреждаемостью требует дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Б. Е., Магеррамова Л. А. Определение кинетики НДС лопаток турбин с использованием различных вариантов учета ползучести программного комплекса ANSYS // Двигатель. – 2008. – № 6. – С. 18–19.
2. Малинин Н. Н. Расчеты на ползучесть элементов машиностроительных конструкций. – М.: Машиностроение, 1981. – 221 с.
3. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Термопрочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.

Статья поступила в редакцию 22.10.2010

Борис Евгеньевич Васильев родился в 1984 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Инженер ФГУП “ЦИАМ им. П.И. Баранова”. Ассистент, аспирант кафедры “Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор пяти научных работ в области динамики, прочности машин, приборов и аппаратуры.

B. Ye. Vasiliev (b. 1984) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Engineer of Federal State Unitary Enterprise “TsIAM im. P.I. Baranova”. Assistant lecturer, post-graduate of “Gas-Turbine and Nontraditional Power Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 publications in the field of dynamics, strength of machines, devices and apparatus.

