

УДК 531.787.089.68-027.542-044.6(476)

М. П. Падобед

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛИЧЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ЭТАЛОНОВ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 1 МПа ДО 10 МПа

В статье рассматриваются результаты проведения дополнительных сличений КООМЕТ № 589/UA/12 национальных эталонов избыточного давления ННЦ ИМ (Украина), БелГИМ (Республика Беларусь), ВНИИМ (Российская Федерация), ВМТ/ВМЦ (Литва). В базе данных ВИРМ сличение указано как COOMET.M.P-S1.

The article reviews the results of the supplementary comparison COOMET № 589/UA/12 of national measurement standards of gauge pressure of NSC IM (Ukraine), BelGIM (Republic of Belarus), VNIIM (The Russian Federation), VMT/VMC (Lithuania). In the BIPM database the comparison is listed as COOMET.M.P-S1.

Развитие науки и современных технологий предъявляет все более высокие требования к точности измерения давления.

Важнейшей задачей современной метрологии является обеспечение единства измерений и взаимное признание результатов измерений и калибровок, выдаваемых национальными метрологическими институтами (НМИ) разных стран.

Целью дополнительных сличений КООМЕТ в области измерения избыточного давления в диапазоне от 1 МПа до 10 МПа является установление степени эквивалентности национальных эталонов в области измерения избыточного давления и обеспечения возможности публикации СМС-строк в базе данных Международного Бюро мер и весов.

Настоящее сличение проводилось для установления степени эквивалентности национальных эталонов, участвующих в сличениях, по отношению к опорному значению эффективной площади транспортируемого эталона (ТЭ).

Изначально на участие в дополнительных сличениях КООМЕТ заявились шесть НМИ:

- ННЦ ИМ (Национальный научный центр «Институт метрологии», г. Харьков, Украина);
- ВНИИМ (Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация);
- БелГИМ (Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии», г. Минск, Республика Беларусь);
- КазИнМетр (Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения «Казахстанский институт метрологии», г. Астана,

Республика Казахстан);

- ВМТ/ВМЦ (Государственное предприятие «Вильнюсский метрологический центр», г. Вильнюс, Литва);

- НИМ (Национальный институт метрологии, г. Кишинев, Молдова).

Лабораторией-пилотом был выбран ННЦ ИМ.

КазИнМетр (Республика Казахстан) завершил свои измерения и предоставил отчет, но решил покинуть сличения на этапе подготовки проекта А отчета. НИМ (Молдова) запросил повторные измерения в 2019 году из-за потери первоначальных данных, основанных на результатах измерений в 2016 году. Их отчет был направлен в институт-пилот после завершения повторных измерений, но НИМ также решил покинуть сличения.

В итоге в сличение приняли участие четыре НМИ, включая институт-пилот:

- ННЦ ИМ;
- БелГИМ;
- ВНИИМ;
- ВМТ/ВМЦ.

Проведение сличений

Сличение национальных эталонов единицы давления выполнялись методом гидростатического уравновешивания. Метод определения эффективной площади измерительной поршневой системы (ИПС) ТЭ (Δp - или p -методы), а также способ установления равновесия между гидростатическими уравновешенными грузопоршневыми манометрами выбирались независимо каждой страной-участницей в соответствии с конкретными рабочими условиями. Лаборатория, которая применяла p -метод (без предварительного уравнове-

шивания ИПС ТЭ и национального эталона НМИ – участника сличений): ВМТ/ВМЦ. Лаборатории, которые применяли Δp -метод (с предварительным уравновешиванием): ННЦ ИМ, ВНИИМ и БелГИМ.

Измерения включали в себя пять циклов, каждый с воспроизведением значения номинального давления, созданы в последовательности (1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 10; 9; 8; 7; 6; 5; 4; 3; 2; 1) МПа. Таким образом, было проведено 100 измерений (10 измерений при каждом давлении).

БелГИМ проводил измерения в пяти точках диапазона сличений 1, 2, 3, 4, 5 МПа, т.к. НЭ РБ 32-18 имеет диапазон воспроизведения от 0,04 до 6 МПа.

Для каждого измерения участники определяли эффективную площадь ($A_{p,i}$) ТЭ посредством гидростатического уравновешивания по отношению к эталонам давления.

Значение $A_{p,i}$ рассчитывалось при температуре 20 °C согласно Δp -методу по формуле

$$A_{p,i} = \frac{\sum_i m_i g \left(1 - \frac{\rho_{0a}}{\rho_0} + \frac{\rho_{0a} - \rho_a}{\rho_i} \right) + 2\sigma \sqrt{\pi A_{0n}}}{p_i [1 + (\alpha + \beta)(t_i - t_0)]}, \quad (1)$$

где $\sum_i m_i$ – общая условная масса поршня, держателя грузов и грузов, помещенных на держатель грузов ТЭ при i -ом измерении;

g – местное значение ускорения свободного падения;

ρ_i – значение плотности частей с массой m_i ;

ρ_a – значение плотности воздуха;

ρ_{0a} – условное значение плотности воздуха;

ρ_0 – условное значение массовой плотности;

σ – значение поверхностного натяжения рабочей жидкости ТЭ;

A_{0n} – значение номинальной эффективной площади ТЭ;

p_i – значение давления, создаваемого лабораторным эталоном при эталонном уровне ТЭ (нижняя поверхность поршня ТЭ) при i -ом измерении;

α, β – значения коэффициентов теплового расширения материалов поршня и цилиндра ТЭ;

t_i – температура ТЭ при i -ом измерении;

$t_0 = 20$ °C.

Значение $A_{p,i}$ рассчитывалось при температуре 20 °C согласно Δp -метода по формуле

$$A_{p,i} = A_{nps} \frac{\left[m_{2i} + M_2(\alpha_2 + \beta_2)(t_2 - t_{2i}) \right]}{\left[1 + (\alpha_1 + \beta_1)(t_i - t_0) \right] \left[1 + \lambda_1 p_{in} \right]} \frac{\left[m_{1i} + M_1(\alpha_1 + \beta_1)(t_1 - t_{1i}) \right]}{\left[1 + (\alpha_2 + \beta_2)(t_{2i} - t_0) \right]}, \quad (2)$$

где A_{nps} – значение эффективной площади эталона НМИ при нулевом давлении;

m_{1i}, m_{2i} – значение массы, приложенной на держатель грузов эталона НМИ или ТЭ при i -ом измерении после предварительного уравновешивания;

M_1, M_2 – значение массы мобильных частей и гирь эталона НМИ и ТЭ при предварительном уравновешивании;

α_1, β_1 – значения коэффициентов теплового расширения материалов поршня и цилиндра эталона НМИ;

α_2, β_2 – значения коэффициентов теплового расширения материалов поршня и цилиндра ТЭ;

t_1, t_2 – температура эталона НМИ и ТЭ при предварительном уравновешивании;

t_{1i}, t_{2i} – температура эталона участника и ТЭ при i -ом измерении;

$t_0 = 20$ °C;

λ_1 – значение коэффициента искажения давления узла поршень/цилиндр эталона участника;

p_{in} – номинальное значение давления при i -ом измерении.

Результаты сличений

Зависящие от давления эффективные площади, усредненные для каждого номинального давления (A_p), их стандартные отклонения и суммарные стандартные неопределенности, полученные участниками сличений, приведены в таблице 1.

Отклонения результатов участников от опорных значений с расширенными ($k=2$) неопределенностями этих отклонений при каждом давлении рассчитывались по формулам

$$d_i = A_{p,i} - A_{p,ref} \quad (3)$$

$$U(d_i) = 2 \cdot \sqrt{u^2(A_{p,i}) + u^2(A_{p,ref})}$$

(для БелГИМ и ВМТ/ВМЦ)

$$U(d_i) = 2 \cdot \sqrt{u^2(A_{p,i}) - u^2(A_{p,ref})}$$

(для ННЦ ИМ и ВНИИМ)

Числовые данные для отклонений и неопределенностей при всех значениях давления указаны в таблице 2 и графически представлены на рисунках 1-5.

Для того чтобы лучшим образом сравнить результаты измерений, использовались критерии формулы нормализованной погрешности (E_n).

$$E_n = \frac{|A_p - A_{p,ref}|}{2\sqrt{u^2(A_p) + u^2(A_{p,ref})}}, \quad (4)$$

$$E_n = \frac{|A_p - A_{p,ref}|}{2\sqrt{u^2(A_p) - u^2(A_{p,ref})}}, \quad (5)$$

Таблица 1

p [МПа]	ННЦ ИМ			БелГИМ			ВНИИМ			ВМТ/ВМЦ		
	A_p [см ²]	$s(A_p)/A_p$ $\times 10^{-6}$	$u(A_p)/A_p$ $\times 10^{-6}$	A_p [см ²]	$s(A_p)/A_p$ $\times 10^{-6}$	$u(A_p)/A_p$ $\times 10^{-6}$	A_p [см ²]	$s(A_p)/A_p$ $\times 10^{-6}$	$u(A_p)/A_p$ $\times 10^{-6}$	A_p [см ²]	$s(A_p)/A_p$ $\times 10^{-6}$	$u(A_p)/A_p$ $\times 10^{-6}$
1	1,000497	1,9	8,0	1,000469	0,7	17,9	1,000473	0,8	9,1	1,000502	8,1	28,2
2	1,000496	1,4	7,5	1,000469	0,9	13,1	1,000476	0,3	9,1	1,000507	7,0	24,5
3	1,000497	0,9	7,3	1,000470	0,7	12,0	1,000477	0,3	9,1	1,000519	4,0	22,9
4	1,000499	1,1	7,2	1,000469	0,6	11,6	1,000479	0,2	9,1	1,000511	8,0	23,4
5	1,000498	0,8	7,2	1,000469	0,6	11,6	1,000481	0,3	9,1	1,000509	5,5	22,5

Таблица 2

p [МПа]	ННЦ ИМ		БелГИМ		ВНИИМ		ВМТ/ВМЦ	
	$d/A_{p,ref}$ $\times 10^{-6}$	$U(d)/A_{p,ref}$ $\times 10^{-6}$	$d/A_{p,ref}$ $\times 10^{-6}$	$U(d)/A_{p,ref}$	d/A $\times 10^{-6}$	$U(d)/A$ $\times 10^{-6}$	$d/A_{p,ref}$ $\times 10^{-6}$	$U(d)/A_{p,ref}$ $\times 10^{-6}$
1	10	11	-18	38	-13	14	15	58
2	8,0	9,5	-19	29	-12	14	19	50
3	7,9	9,1	-19	27	-12	14	30	47
4	7,8	8,9	-22	26	-12	14	20	48
5	6,7	8,9	-22	26	-11	14	18	46

Таблица 3

p [МПа]	Значения E_n					
	ННЦ ИМ		БелГИМ		ВНИИМ	ВМТ/ВМЦ
1	0,98		0,47		0,98	0,27
2	0,85		0,67		0,85	0,38
3	0,87		0,72		0,87	0,64
4	0,88		0,87		0,88	0,42
5	0,75		0,87		0,75	0,39

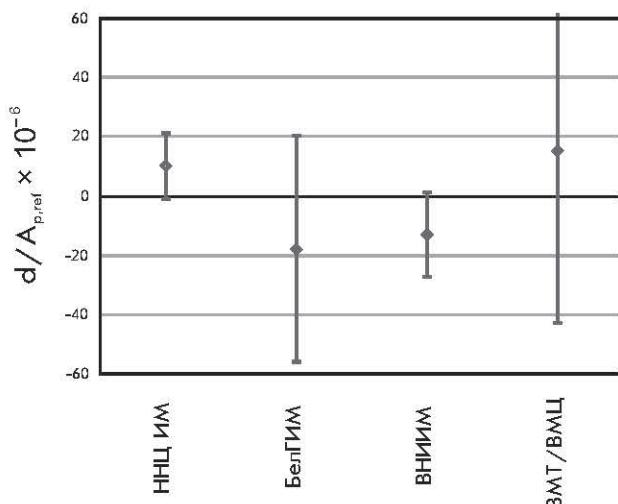


Рис. 1. Относительные отклонения результатов участников от опорного значения и расширенные ($k = 2$) неопределенности этих отклонений при 1 МПа

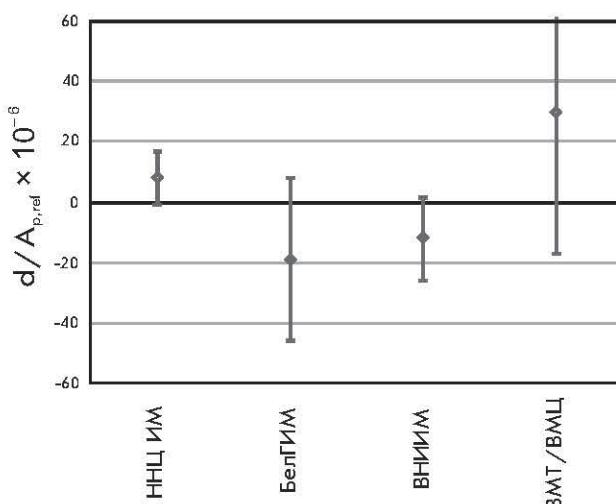


Рис. 3. Относительные отклонения результатов участников от опорного значения и расширенные ($k = 2$) неопределенности этих отклонений при 3 МПа

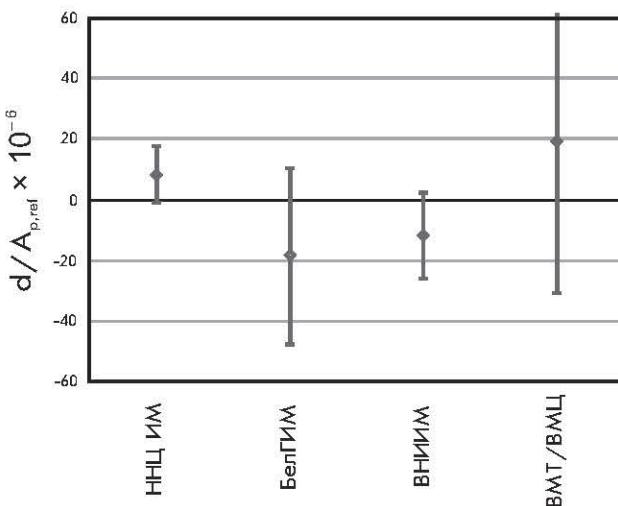


Рис. 2. Относительные отклонения результатов участников от опорного значения и расширенные ($k = 2$) неопределенности этих отклонений при 2 МПа

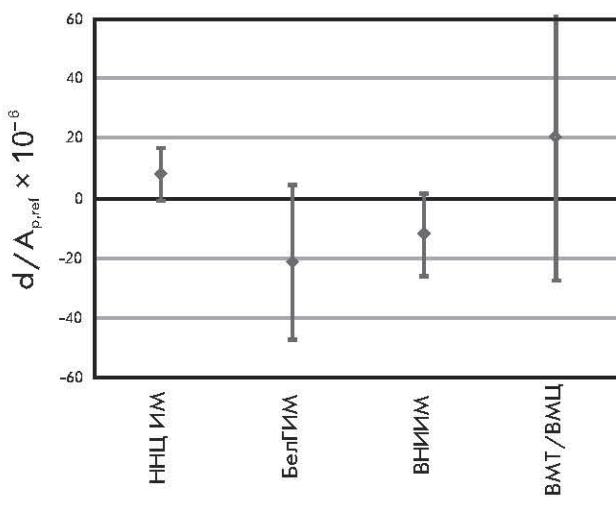


Рис. 4. Относительные отклонения результатов участников от опорного значения и расширенные ($k = 2$) неопределенности этих отклонений при 4 МПа

где: A_p – результаты участника;
 $A_{p,ref}$ – взвешенное опорное значение;
 $u(A_p)$ – стандартные неопределенности участников;
 $u(A_{p,ref})$ – стандартные неопределенности опорного значения.

Результаты оцениваются на основании нормализованной погрешности в соответствии с полученными значениями, где:

$E_n \leq 1$ Удовлетворительный результат;
 $E_n > 1$ Неудовлетворительный результат.
Для БелГИМ и ВМТ/ВМИ применялась формула (4), для ННЦ ИМ и ВНИИМ – (5).

В таблице 3 приведены значения нормализованной погрешности при каждом давлении для участвующих лабораторий в отношении опорных значений.