

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО КОНТРОЛЯ С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

**В.А. Вебер**

*Трехгорный технологический институт, филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Трехгорный, Российская Федерация  
E-mail: vebervera@gmail.com*

Рассматриваются вопросы математического моделирования при многопараметровом контроле. Цель работы – обоснование необходимости учета конструктивной особенности датчика при построении математических моделей многопараметрового контроля и разработка методологии определения обобщающей характеристики – коэффициента конструктивной чувствительности вихретокового преобразователя. Методология определения основана на анализе годографов вихретокового контроля. Произведены вычислительные эксперименты для расчета конструктивной чувствительности для каждой измерительной точки и всех толщин образцов и величин зазоров. Результаты позволяют оценить конструктивную эффективность используемого вихретокового датчика.

*Ключевые слова: вихретоковый контроль; конструктивная особенность датчика; конструктивная чувствительность вихретокового преобразователя.*

**Введение.** В условиях эксплуатации на протяжении длительного времени трубопроводы подвергаются различным внешним и внутренним воздействиям, в результате чего происходит деградация материала, коррозионные повреждения, возникают и развиваются трещины усталости на поверхностях труб и другие виды дефектов. Кроме того, возможны внутренние дефекты технологического происхождения. Несмотря на то, что проектирование трубопроводов по современным меркам и технология изготовления и монтажа должно обеспечить реализацию назначенного ресурса, исключить возможность возникновения таких дефектов нельзя. Чтобы избежать серьезных последствий влияния дефектов, вплоть до нарушений сплошности конструкций, ведущих к аварийным ситуациям, проводятся теоретические исследования работы конструкций, содержащих дефекты, моделирование критических состояний труб и вычислительные эксперименты [1–12].

Современные методы и средства неразрушающего контроля [13, 14], используемые для диагностики трубопроводов, получили широкое развитие и распространение. Одним из широко используемых методов неразрушающего контроля является метод вихревых токов.

Основными сферами использования вихретокового измерительного преобразования являются структуроскопия, дефектоскопия, толщинометрия, измерение угловых и линейных геометрических параметров, селективное обнаружение металлических предметов, измерение электрических и магнитных характеристик материалов и изделий, измерение механических напряжений и деформаций и т. д. [15]. Наряду с указанными выше достоинствами очевидно, что для получения информации об объекте при большом числе влияющих параметров требуется и большое число измеряемых параметров сигнала вихретокового преобразователя, связанных независимыми функциями преобразования с измеряемыми параметрами объекта [16]. Принципы обработки сигналов вихретокового преобразователя при многопараметровом контроле сводятся к решению системы нелинейных уравнений [17]. При составлении данных уравнений не учитывается конструктивная особенность используемого датчика. Построение математической модели ориентировано на модельный вариант: датчик, представляющий собой одновитковую катушку, расположенный непосредственно на плоскости объекта контроля.

Цель работы – обоснование необходимости учета конструктивной особенности датчика при построении математических моделей многопараметрового контроля и разработка методологии определения обобщающей характеристики – коэффициента конструктивной чувствительности вихретокового преобразователя.

**Обозначения и допущения.** В работах российских и зарубежных авторов рассматриваются различные подходы и разные параметры для оценки эффективности вихретокового преобразователя [18].

В работе [19] предлагается использовать параметр  $\xi$ , равный внесённой объектом контроля относительной индуктивности или относительному реактивному сопротивлению при значении обобщенного параметра  $\beta \rightarrow \infty$  (на большой рабочей частоте ВТП). При проведении измерений достижение больших значений  $\beta$  проблематично, в связи с чем значение  $\xi$  не точно отображает эффективность вихретокового преобразователя.

Введем обозначение для обобщенной характеристики вихретокового преобразователя – конструктивной чувствительности  $S_c$ .

Приведенная теория параметрического накладного датчика с магнитопроводом рассматривает понятие коэффициента взаимной индукции между катушкой и ее зеркальным отображением и представлено формулой:

$$M = M_0 e^{-\frac{3h}{R_3}}. \quad (1)$$

Формула отображает взаимосвязь – экспоненциальную зависимость выходного сигнала от зазора и эквивалентного радиуса обмотки измерительной катушки. Зазор представляет совокупность реального зазора между ВТП и объектом контроля и расстояния между витками и рабочей поверхностью датчика.

Рассмотрим поведение годографов на примере решения задачи толщинометрии электропроводящего покрытия (Pb) на ферромагнитном основании (сталь 12X18НТ). Годографы приведены на рис. 1.

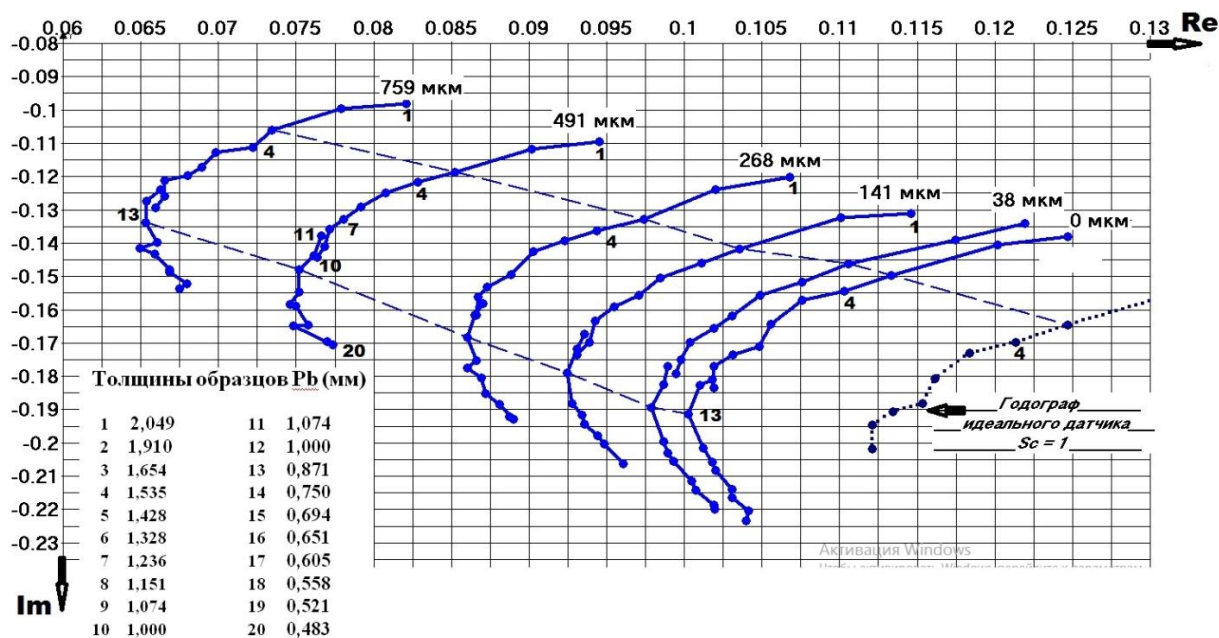


Рис. 1. Годографы обобщенных составляющих Re и Im при различных толщинах покрытия (0,483–2,049 мм) и различных зазорах (0, 38, 141, 268, 491, 759 мкм)

Измерения для построения годографов проводились в два этапа: на диапазоне измерения толщины 0,5–1,0 и 1,0–2,0 мм и с разными зазорами. Необходимость двух этапов обусловлена ограниченностью поверхности основания для размещения 20 образцов.

Эквивалентные точки по толщине покрытия для годографов с различными зазорами, соединённые между собой образуют квазилинию, уходящую в точку с координатами, близкими к 0;0 (по Re и Im составляющим).

Пусть существует годограф, который является идеальным и подобен построенным на основе измерения годографам.

**Предложение 1.** Предположим, что отношение длины вектора любой точки годографа с 0 зазором к длине соответствующей точки идеального годографа равно 0,90909. Обозначим данное соотношение как конструктивную чувствительность вихрекового преобразователя и представим в виде:

$$S_c = l_0 / l_{ид} \quad (2)$$

Тогда все годографы, расположенные левее идеального, имеют параметр конструктивной чувствительности вихрекового преобразователя меньше указанного выше нулевого годографа.

**Вычислительные эксперименты.** Рассчитаем значение конструктивной чувствительности для каждой измерительной точки и всех толщин образцов и величин зазоров.

Проведем расчет координат Re, Im и длину вектора для предполагаемого идеального годографа с использованием предполагаемого коэффициента 0,90909. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Расчет координат и длин векторов**

0,5–1,0 мм			1,0–2,0 мм		
Re	Im	l	Re	Im	l
0,11200	-0,19912	0,22846	0,13714	-0,15181	0,20458
0,11108	-0,20085	0,22952	0,13220	-0,15448	0,20332
0,11029	-0,21038	0,23754	0,12468	-0,16466	0,20654
0,11134	-0,22169	0,24808	0,12132	-0,16985	0,20873
0,11200	-0,22642	0,25261	0,11836	-0,17297	0,20959
0,11220	-0,22918	0,25516	0,11612	-0,18077	0,21486
0,11338	-0,23526	0,26116	0,11533	-0,18809	0,22064
0,11338	-0,23796	0,26359	0,11342	-0,19074	0,22192
0,11457	-0,24236	0,26807	0,11210	-0,19460	0,22458
0,11437	-0,24563	0,27095	0,11210	-0,20170	0,23076

Подобным образом рассчитываем длины векторов для всех толщин для годографов с зазорами.

Для каждого зазора рассчитаем  $S_c$  согласно вышеприведенной формуле. Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

**Конструктивная чувствительность для каждого зазора при разных толщинах**

0,88743	0,88561	0,83868	0,85071	0,79054	0,78565	0,69058	0,70690	0,61492	0,62542
0,90333	0,89526	0,85107	0,84628	0,79908	0,78954	0,70883	0,70657	0,62343	0,62144
0,89721	0,88788	0,84840	0,84957	0,79614	0,79740	0,69894	0,70730	0,62696	0,62470
0,89782	0,89044	0,84601	0,85065	0,78770	0,79440	0,69349	0,70540	0,62315	0,63500
0,89435	0,89594	0,84399	0,85767	0,78044	0,79722	0,69307	0,70986	0,61639	0,63300
0,89438	0,89297	0,84488	0,85367	0,78530	0,78551	0,68858	0,70476	0,61792	0,63291
0,89662	0,88149	0,83951	0,84102	0,78398	0,78791	0,69393	0,69876	0,62196	0,62360
0,89770	0,88921	0,84068	0,84947	0,78884	0,79429	0,68659	0,70434	0,61857	0,62315
0,90012	0,89710	0,84907	0,86389	0,79210	0,79525	0,69880	0,71495	0,62196	0,63414
0,89495	0,88861	0,83955	0,85312	0,78117	0,79451	0,68696	0,70731	0,61975	0,62970

Вычислим относительное отклонение от среднего. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Относительное отклонение от среднего**

0,01000	0,00544	0,00653	0,00105	0,00255	0,00823	0,00490	0,00039	0,00899	0,00459
0,00774	0,00540	0,00815	0,00626	0,01338	0,00332	0,02140	0,00007	0,00472	0,01093
0,00091	0,00288	0,00499	0,00239	0,00966	0,00660	0,00715	0,00096	0,01040	0,00575
0,00159	0,00002	0,00216	0,00113	0,00105	0,00281	0,00070	0,00172	0,00428	0,01064
0,00227	0,00617	0,00023	0,00712	0,01026	0,00638	0,00132	0,00458	0,00662	0,00746
0,00224	0,00282	0,00082	0,00242	0,00410	0,00841	0,00778	0,00263	0,00415	0,00732
0,00025	0,01006	0,00554	0,01243	0,00577	0,00537	0,00007	0,01112	0,00235	0,00750
0,00146	0,00140	0,00416	0,00251	0,00039	0,00268	0,01066	0,00322	0,00310	0,00821
0,00417	0,00746	0,00578	0,01442	0,00452	0,00389	0,00695	0,01180	0,00235	0,00927
0,00160	0,00206	0,00549	0,00177	0,00933	0,00295	0,01011	0,00098	0,00121	0,00222

## Физика

В результате анализа получаем из 120 измерительных точек (20 образцов, 6 зазоров) 13 точек – погрешность примерно 1 %, 1 точка = 2,14 %. Полученные погрешности определения  $S_c$  обусловлены наличием инструментальной погрешности при проведении измерений.

**Основные результаты.** Выполненные расчеты показывают, что методология определения  $S_c$  инвариантна к измерительной точке.

**Предложение 2.** В рассмотренном вычислительном эксперименте идеальный годограф выбран произвольно. Проведя итерационные вычисления при изменении значений  $S_c$  и эквивалентного радиуса вихретокового преобразователя возможно получить экспоненту совпадающей с идеальной.

**Вычислительные эксперименты.** Вычисления проведены с помощью среды визуального программирования LabView. На рис. 2 показан модуль расчета требуемой компоненты.

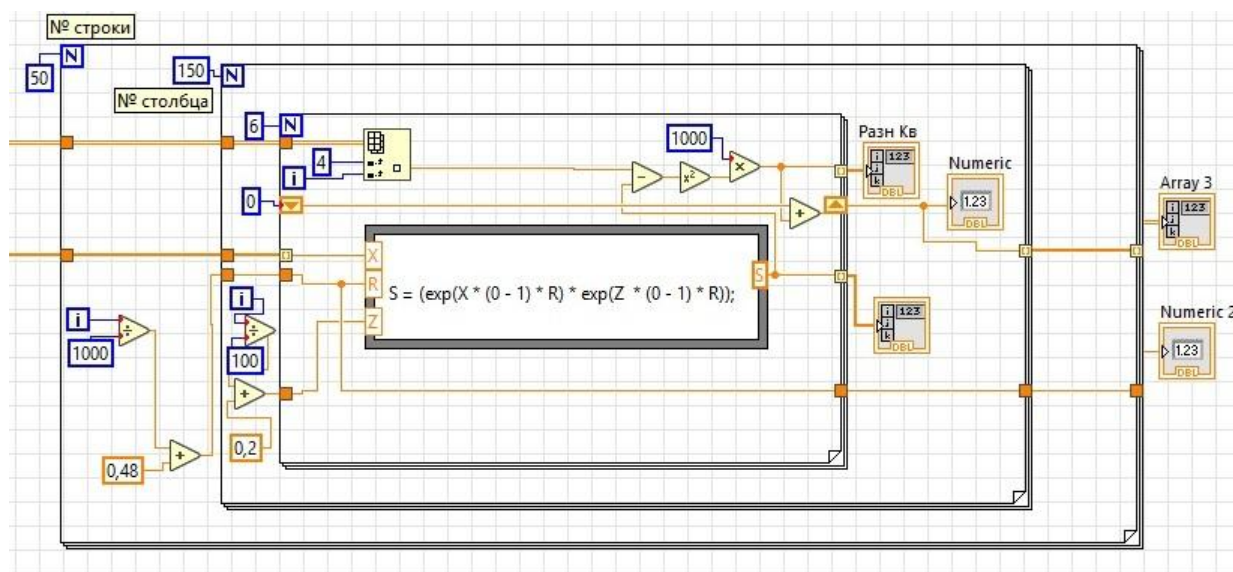


Рис. 2. Модуль расчета требуемой компоненты

В результате вычислений (табл. 4) для трех рабочих частот и трех диапазонов толщин полученные коэффициенты  $S_c$  лежат в пределах от 0,69 до 0,75.

Такой разброс обусловлен наличием инструментальной погрешности в измерениях и соответственно большим разбросом определения параметров  $R_{экв}$ . Полученная точность определения  $S_c$  вполне удовлетворяет запросам практического использования.

Полученные коэффициенты  $S_c$

Таблица 4

	Рабочие частоты	Полученные коэффициенты $S_c$						Среднее
		0,5–1,0 мм		1,0–2,0 мм		2,0–4,0 мм		
		$S_c$	Дэкв	$S_c$	Дэкв	$S_c$	Дэкв	
								0,75
								0,70
	1,88 кГц	0,75	15,20	0,71	11,50	0,70	11,50	0,70
	4,2 кГц	0,70	11,50	0,71	12,10	0,68	10,60	0,71
	8,8 кГц	0,70	11,50	0,69	11,10	0,69	11,10	0,71
								0,69
								0,70
								0,68
								0,69
								<b>0,70</b>

**Заключение.** В результате работы обоснована необходимость учета конструктивной особенности датчика при построении математических моделей многопараметрового контроля и разработана методология определения обобщающей характеристики – коэффициента конструктивной чувствительности вихретокового преобразователя. Произведены вычислительные эксперименты

для расчета конструктивной чувствительности для каждой измерительной точки и всех толщин образцов и величин зазоров. Создана программа в среде визуально графического программирования – LabView для итерационного вычисления при изменении значений  $S_c$  и эквивалентного радиуса вихретокового преобразователя.

### Литература

1. Дильман, В.Л. Напряженное состояние и прочность неоднородной пластической полосы с дефектом в более прочной части / В.Л. Дильман // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2010. – № 2. – С. 89–102.
2. Когут, Н.С. Несущая способность сварных соединений / Н.С. Когут, М.В. Шахматов, В.В. Ерофеев. – Львов: Свит, 1991. – 182 с.
3. Dil'man, V.L. Strength of Mechanically Heterogeneous Welded Joints With a Slit-Like Defect / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Welding International. – 1999. – Vol. 13, no. 8. – P. 648–650.
4. Dil'man, V.L. Load-Carrying Capacity of Straight-Seam Large Diameter Pipes with Defects at the Fusion Boundary of the Welded Joint / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Welding International. – 2003. – Vol. 17, Iss. 5. – P. 376–380.
5. Dil'man, V.L. Static Strength of a Welded Joint with Hard Interlayers and Defect at the Fusion Line of the Weld / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Welding International. – 2004. – Vol. 18, no. 10. – P. 805–808.
6. Dil'man, V.L. Effects of surface defects on the static strength of welds in spiral-seam tubes / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Chemical and Petroleum Engineering. – 2004. – Vol. 40, Iss. 1–2. – P. 87–93.
7. Dil'man, V.L. Analysis of the Ductile Strength of Welds Weakened by Notches in Longitudinally Welded Pipes of Large Diameter by the Method of Slip Lines / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Strength of Materials. – 2004. – Vol. 36, Iss. 3. – P. 274–281.
8. Dil'man, V.L. Static Strength of Mechanically Nonuniform Welded Joints with a One-Sided Surface Defect Subject to Ductile Failure / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Chemical and Petroleum Engineering. – 2005. – Vol. 41, Iss. 9–10. – P. 522–529.
9. Dil'man, V.L. Effect of Defects on the Load Carrying Capacity of Pipes of Transmission Oil and Gas Pipelines under Biaxial Loading / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Welding International. – 2006. – Vol. 20, no. 1. – P. 63–67.
10. Остсемин, А.А. Влияние дефектов сварки, расположенных на границе сплавления, на прочность сварного соединения / А.А. Остсемин, В.Л. Дильман // Вестник машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 21–26.
11. Дильман, В.Л. Математическое моделирование критических состояний мягких прослоек в неоднородных соединениях / В.Л. Дильман, Т.В. Ерошкина. – Челябинск: Издательский Центр ЮУрГУ, 2011. – 275 с.
12. Носачева, А.И. Математическое моделирование напряженного состояния неоднородной полосы с наружным макродефектом / А.И. Носачева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 79–84.
13. Петин, С.В. Обзор методов дефектоскопии при обследовании трубопроводов / С.В. Петин, В.Г. Сидоренко // Молодой ученый. – 2016. – № 2. – С. 194–199. <https://moluch.ru/archive/106/25262/>
14. Внутренние и международные стандарты методов неразрушающего контроля обсадных колонн / XU Jin-long, CAO Biao, HONG Wu-xing, LU Shan-sheng, FENG Jun-han, HUA Bin, YANG Shu-jie // Методы неразрушающего контроля. – 2014. – Т. 36, № 10. – С. 72–77.
15. Ян, Ч. Физическое и математическое моделирование измерительных преобразований в полях вихревых токов / Ч. Ян // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 3. – С. 75–85.
16. Гольдштейн, А.Е. Физические основы получения информации: учебник / А.Е. Гольдштейн. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 291 с.
17. Veber, V. Ongoing Control of Technological Processes for Thickness Measurement Tasks Using Eddy-Current Testing Technique / V. Veber, V. Dilman, A. Veber // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8501607>

18. Capobianco, T.E. Eddy Current Probe Sensitivity as a Function of Coil Constuction Parametrs / T.E. Capobianco, J.D. Splett, H.K. Iyer // *Reseach in Nondestructive Evaluation*. – 1990. – Vol. 2. – Iss. 3. – P. 169–186.

19. Учанин, В.Н. Инвариантная оценка эффективности вихретоковых обмоток для разработки новых преобразователей и технологий контроля / В.Н. Учанин // *Материалы 7-й национальной конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика UkrNTD-2012»*. – Киев: УТ НКТД, 2012. – С. 66–71.

*Поступила в редакцию 1 октября 2019 г.*

---

*Bulletin of the South Ural State University  
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"  
2019, vol. 11, no. 4, pp. 73–79*

---

DOI: 10.14529/mmph190409

## MATHEMATICAL MODELING FOR MULTI-PARAMETER CONTROL CONSIDERING DESIGN FEATURES OF EDDY-CURRENT CONVERTERS

**V.A. Veber**

*Trekhgornyy Technological Institute, Branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Nuclear University "MEPhI", Trekhgornyy, Russian Federation  
E-mail: vebervera@gmail.com*

This study considers the issues of mathematical modeling in case of multi-parameter control. The purpose of the article is to substantiate the necessity of taking into account the design features of the sensor when constructing mathematical models for multi-parameter control, and to develop a methodology for determining the generalizing characteristics - the design sensitivity coefficient of an eddy-current converter. The methodology is based on the analysis of hodographs of the eddy-current control. Simulation experiments in order to calculate design sensitivity for each control points as well as for every thickness of samples and for each size of gaps have been carried out. The obtained results allow us estimate design efficiency of the used eddy-current sensor.

*Keywords: eddy-current test; design feature of the sensor; design sensitivity of eddy-current converter.*

### References

1. Dil'man V.L. Stress State and Strength of an Inhomogeneous Plastic Strip with a Defect in a Stronger Part. *Mechanics of Solids*, 2010, Vol. 45, no. 2, pp. 226–237. DOI: 10.3103/s0025654410020081
2. Kogut N.S., Shakhmatov M.V., Erofeev V.V. Nesushchaya sposobnost' svarnykh soedineniy (Bearing Capacity of Welded Joints). L'vov, Svit Publ., 1991, 182 p. (in Russ.).
3. Dil'man V.L., Ostsemin A.A. Strength of Mechanically Heterogeneous Welded Joints with a Slit-Like Defect. *Welding International*, 1999, Vol. 13, no. 8, pp. 648–650.
4. Dilman V.L., Ostsemin A.A. Load-Carrying Capacity of Straight-Seam Large Diameter Pipes with Defects at the Fusion Boundary of the Welded Joint. *Welding International*, 2003, Vol. 17, Iss. 5, pp. 376–380. DOI: 10.1533/wint.2003.3013
5. Dilman V.L., Ostsemin A.A. Static Strength of a Welded Joint with Hard Interlayers and Defect at the Fusion Line of the Weld. *Welding International*, 2004, Vol. 18, Iss. 10, pp. 805–808. DOI: 10.1533/weli.17.5.376.22011
6. Dilman V.L., Ostsemin A.A. Effects of Surface Defects on the Static Strength of Welds in Spiral-Seam Tubes. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2004, Vol. 40 (1–2), pp. 87–93. DOI: 10.1023/B:CAPE.0000024143.53688.ca
7. Dilman V.L., Ostsemin A.A. Analysis of the Ductile Strength of Welds Weakened by Notches in Longitudinally Welded Pipes of Large Diameter by the Method of Slip Lines. *Strength of Materials*, 2004, Vol. 36, Iss. 3, pp. 274–281. DOI: 10.1023/B:STOM.0000035761.47001.4c

8. Dil'man V.L., Ostsemin A.A. Static Strength of Mechanically Nonuniform Welded Joints with a One-Sided Surface Defect Subject to Ductile Failure. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2005, Vol. 41, Iss. 9–10, pp. 522–529. DOI: 10.1007/s10556-006-0012-6

9. Dil'man V.L., Ostsemin A.A. Effect of Defects on the Load Carrying Capacity of Pipes of Transmission Oil and Gas Pipelines under Biaxial Loading. *Welding International*, 2006, Vol. 20, no. 1, pp. 63–67.

10. Ostsemin, A.A., Dil'man V.L. Vliyanie defektov svarki, raspolozhennykh na granitse splavleniya, na prochnost' svarnogo soedineniya (The Impact that Welding Defects Located at the Fusion Boundary Have on the Strength of a Welded Joint). *Vestnik mashinostroeniya*, 2006, no. 2, pp. 21–26. (in Russ.).

11. Dil'man V.L., Eroshkina T.V. *Matematicheskoe modelirovanie kriticheskikh sostoyaniy myagkikh prosloek v neodnorodnykh soedineniyakh* (Mathematical Modeling of Soft Layers Critical State in Inhomogeneous Compounds). Chelyabinsk, Izdatel'skiy Tsentr YuUrGU Publ., 2011, 275 p. (in Russ.).

12. Nosacheva A.I. Mathematical Modelling a Stress State of Inhomogeneous Band with External Macrodefect. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematical Modelling, Programming & Computer Software"*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 79–84. (in Russ.).

13. Petinov S.V., Sidorenko V.G. Obzor metodov defektoskopii pri obsledovanii truboprovodov (A Review of Flaw Detection Methods for Pipeline Inspection). *Molodoy uchenyy*, 2016, no. 2, pp. 194–199. URL <https://moluch.ru/archive/106/25262/> (in Russ.).

14. XU Jin-long, CAO Biao, HONG Wu-xing, LU Shan-sheng, FENG Jun-han, HUA Bin, YANG Shu-jie Vnutrennie i mezhdunarodnye standarty metodov nerazrushayushchego kontrolya obsadnykh kolonn (Domestic and International Standards for Non-Destructive Casing String Testing). *Metody nerazrushayushchego kontrolya*, 2014, Vol. 36, no. 10, pp. 72–77. (in Russ.).

15. Yan Ch. Fizicheskoe i matematicheskoe modelirovanie izmeritel'nykh preobrazovaniya v polyakh vikhrevykh tokov (Physical and mathematical modeling of measurement transformations in eddy current fields). *Vestnik nauki Sibiri*, 2013, no. 3, pp. 75–85. (in Russ.).

16. Gol'dshteyn A.E. *Fizicheskie osnovy polucheniya informatsii: uchebnik* (Physical Fundamentals of Information Obtainment: Textbook). Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta Publ, 2010, 291 p. (in Russ.).

17. Veber V., Dilman V., Veber A. Ongoing Control of Technological Processes for Thickness Measurement Tasks Using Eddy-Current Testing Technique. *Proc. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8501607>. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501607

18. Capobianco T.E., Splett J.D., Iyer H.K. Eddy Current Probe Sensitivity as a Function of Coil Constuction Parametrs. *Reseach in Nondestructive Evaluation*, 1990, Vol 2, Iss. 3, pp. 169–186. DOI: 10.1007/BF01606356

19. Uchanin V.N. Invariantnaya otsenka effektivnosti vikhretokovykh obmotok dlya razrabotki novykh preobrazovateley i tekhnologiy kontrolya (Invariant Estimation of the Efficiency of Eddy-Current Winding for the Development of New Converters and Control Techniques). *Materialy 7-y natsional'noy konferentsii "Nerazrushayushchiy kontrol' i tekhnicheskaya diagnostika UkrNTD-2012"* (Proc. 7th National Conference "Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics UkrNTD-2012"), Kiev, UT NKTD Publ., 2012, pp. 66–71. (in Russ.).

Received October 1, 2019