

ВЕСТНИК

Белорусско-Российского университета

*Научно-методический журнал
Издается с октября 2001 г.*

Периодичность – 4 раза в год

1(74) 2022

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

КАПСКИЙ Д. В. Пример построения матрицы межрайонных корреспонденций	5
КАПСКИЙ Д. В. Транспортные передвижения для построения сети городского пассажирского транспорта и транспортной системы в целом	17
КУЛЬГЕЙКО М. П., СИМАНОВИЧ Н. М., КУЛЬГЕЙКО Г. С. К вопросу о возможности реализации совмещенной технологии магнитно-электрических способов обработки.....	31
ЛИННИК Д. А., БИЛЫК О. В. Конструкция опытного демпфера системы подрессоривания кабины колесного трактора	39
ПАНОВ А. Н., МРОЧЕК Ж. А., ПАШКЕВИЧ В. М. Методология и модели риск-ориентированного проектирования, производства, эксплуатации, обслуживания и утилизации – новая фундаментальная система обеспечения конкурентоспособности машиностроения	49
ТАРАСИК В. П. Методика моделирования экстренного торможения автомобиля на опорной поверхности типа «микст»	64
ТАРАСИК В. П., ПУЗАНОВА О. В. Моделирование режима испытаний «переставка» при оценке управляемости и устойчивости автомобиля	76

ФЕТИСОВА Е. А., КОРОТЕЕВ А. О., КОРОТЕЕВА А. А. Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями	87
--	----

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

КОВАЛЬ А. С. К вопросу расчета управляемых электромагнитных потерь в двигателе в пускотормозных режимах работы регулируемого асинхронного электропривода лифта	97
---	----

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

БОРИСОВ В. И., СЕРГЕЕВ С. С., ПРОКОПЕНКО Е. Н. Акустическое поле излучения трехпластинчатого пьезоэлектрического преобразователя	110
---	-----

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

КОТОВ Ю. Н. Деформация фундаментной плиты на разных моделях упругого основания при условии ограничений на перемещения плиты	118
--	-----

ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

ЛИХАЧЕВ В. В. Совершенствование процессов биологической очистки целлюлозно-бумажных фабрик путем внедрения альтернативных методов очистки сточных вод	128
--	-----

- Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам
- Публикуемые материалы рецензируются
- Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014
для предприятий и организаций – 000142

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

KAPSKY D. V. Example of constructing a matrix of inter-district correspondence	5
KAPSKY D. V. Transport movement in constructing urban passenger transport network and transport system as a whole	17
KULGEYKO M. P., SIMANOVICH N. M., KULGEYKO G. S. On the possibility of using the combined technology of magnetoelectric processing techniques	31
LINNIK D. A., BILYK O. V. The design of an experimental damper for suspension system of a wheeled tractor driver cab	39
PANOV A. N., MROCHEK Z. A., PASHKEVICH V. M. Methodology and models of risk-oriented design, production, operation, maintenance and utilization as a new fundamental system for ensuring competitiveness of mechanical engineering	49
TARASIK V. P. Technique for simulating vehicle emergency braking on a «mixt»-type bearing surface	64
TARASIK V. P., PUZANOVA O. V. Simulation of evasive maneuver test in assessing vehicle drivability and stability	76
FIATSIŠAVA K. A., KARATSEYEU A. O., KARATSEYEVA A. A. Metallurgical processes during arc welding in the protective gas atmosphere modified by haloide compounds	87

ELECTRICAL ENGINEERING

KOVAL A. S. On calculation of controlled electromagnetic losses in the motor during start-brake operation modes of adjustable asynchronous electric drive in elevators	97
---	----

INSTRUMENT MAKING

BORISOV V. I., SERGEEV S. S., PROKOPENKO E. N. Acoustic radiation field of a three-layer piezoelectric transducer	110
--	-----

CIVIL ENGINEERING. ARCHITECTURE

KOTOV Y. N. Deformation of the foundation plate for different models of elastic foundation with restrictions on plate displacements	118
--	-----

**LABOUR PROTECTION. ENVIRONMENT PROTECTION.
GEOECOLOGY**

ЛИХАЧЫОВ В. В. Improving biological treatment processes of pulp
and paper mills by introducing alternative methods for industrial waste-
water treatment 128

МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481_2022_1_5

УДК 656

Д. В. Капский

ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ МАТРИЦЫ МЕЖРАЙОННЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ

D. V. Kapsky

EXAMPLE OF CONSTRUCTING A MATRIX OF INTER-DISTRICT CORRESPONDENCE

Аннотация

Следует внедрять политику по регулированию транспортного спроса, повышению привлекательности маршрутного пассажирского транспорта, развитию средств индивидуальной мобильности и немоторизованного транспорта (за счет разработки планов устойчивой городской логистики), в первую очередь в крупнейших городах. Для этого необходимо владеть адекватными методиками построения матриц межрайонных корреспонденций с учётом того, что требуется исключать лишние поездки (особенно на индивидуальном транспорте), повышать привлекательность маршрутного пассажирского транспорта и в целом мобильность населения, смещать «вектор использования» транспорта на экологичный в сторону «зеленой» устойчивой транспортной сети. Это позволит не только решить транспортные проблемы города, но и научно обосновать мероприятия, направленные на их решения для устойчивого развития городской транспортной системы и города в целом.

Ключевые слова:

город, устойчивость, мобильность, издержки, городской маршрутный пассажирский транспорт, транспортная система, эффективность.

Для цитирования:

Капский, Д. В. Пример построения матрицы межрайонных корреспонденций / Д. В. Капский // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 5–16.

Abstract

It is necessary to introduce policies that will manage transport demand, increase attractiveness of regular passenger transport, develop means of individual mobility and non-motorized transport (through the development of sustainable urban logistics plans), primarily in the largest cities. To do this, adequate methods for constructing matrices of inter-district correspondence are required, taking into account the requirements to exclude unnecessary trips (especially individual motorized trips), to increase the attractiveness of regular passenger transport and, in general, the population mobility, to shift the vector of transport use to the environmentally friendly one and towards “green” sustainable transport network. This will make possible not only to solve transport problems of the city, but also to scientifically substantiate measures aimed at solving them for the sustainable development of urban transport system and the city as a whole.

Keywords:

city, sustainability, mobility, costs, regular urban passenger transport, transport system, efficiency.

For citation:

Kapsky, D. V. Example of constructing a matrix of inter-district correspondence / D. V. Kapsky // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 5–16.

Введение

Бесперебойное функционирование современных городов как единого организма от доставки почты (посылок), розничной торговли, сбора отходов и мусора, транспортировки строительных материалов и оборудования до создания точек роста для дальнейшего развития экосоциосистемы города невозможно без четкого планирования и работы транспортной системы [1, 2]. Она, безусловно, может помочь улучшить экономические показатели развития города, повысить эффективность, улучшить качество воздуха и снизить выбросы углерода, а также обеспечить более упорядоченное движение транспорта и безопасность движения (повысить совокупное качество дорожного движения, которое характеризуется минимумом социальных, экономических, экологических и аварийных потерь) [3, 4].

Роль городской транспортной системы повышается с бурно растущими возможностями, связанными с информационно-коммуникационными технологиями, цифровой трансформацией городских пространств и широким применением интеллектуальных транспортных систем. Именно поэтому необходимо разработать соответствующие методики определения матриц межрайонных корреспонденций, которые бы адекватно показывали тенденции транспортного развития города и транспортного спроса, позволяя оценивать устойчивость развития транспортной системы и города в целом [5, 6].

Расчет и балансировка часовой матрицы межрайонных корреспонденций на основе гравитационного подхода

На основе результатов расчета параметров генерации поездок («отправления» и «прибытия» в утренний максимальный час) можно рассчитать матрицу межрайонных корреспонденций [7, 8]. Данная задача не имеет однозначного решения, поэтому необходимо воспользоваться одним из известных методов расчета матриц, например, гравитационным или энтропийным. Воспользуемся для построения матрицы наиболее простым методом – гравитационным, в основе которого лежит формула

$$x_{ij} = k_{\text{гр}} P_i Q_j / c_{ij}^2, \quad (1)$$

где x_{ij} – объем корреспонденций между районами i и j , тыс. чел./ч; P_i – объем отправок из района i , тыс. чел./ч; Q_j – объем прибытий в район j , тыс. чел./ч; c_{ij} – обобщенная стоимость передвижения между районами i и j (аналог расстояния); $k_{\text{гр}}$ – некоторая константа гравитационной модели.

На x_{ij} накладываются естественные ограничения $\sum_i x_{ij} = P_i$; $\sum_j x_{ij} = Q_j$.

Примем допущение

$$c_{ij} = l_{ij\text{пр}}, \quad (2)$$

где $l_{ij\text{пр}}$ – расстояние по прямой (по воздуху) между центроидами транспортных районов, м.

Измерив расстояния по карте (рис. 1), сформируем матрицу расстояний (табл. 1). Данная матрица будет являться симметричной относительно диагонали.

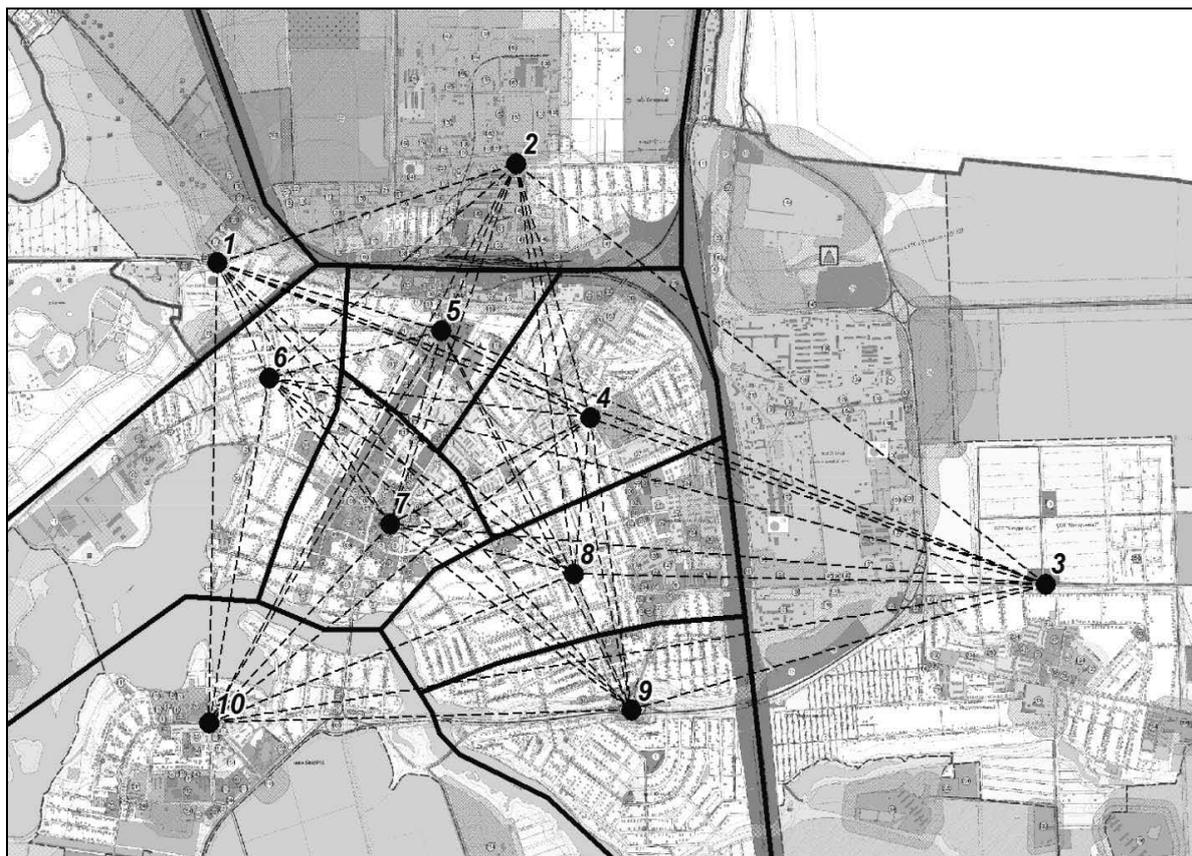


Рис. 1. «Воздушные» прямые между центроидами транспортных районов

Табл. 1. Матрица расстояний между транспортными районами

В метрах

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		2350	6670	3030	1760	930	2310	3520	4520	3350
2	2350		5040	1930	1330	2420	2780	3010	4070	4660
3	6670	5040		3640	4920	6040	4960	3560	3240	6370
4	3030	1930	3640		1290	2440	1690	1140	2150	3620
5	1760	1330	4920	1290		1340	1460	2040	3120	3330
6	930	2420	6040	2440	1340		1410	2710	3660	2550
7	2310	2780	4960	1690	1460	1410		1430	2270	1970
8	3520	3010	3560	1140	2040	2710	1430		1090	2940
9	4520	4070	3240	2150	3120	3660	2270	1090		3180
10	3350	4660	6370	3620	3330	2550	1970	2940	3180	

Рассчитаем элементы матрицы корреспонденций по формуле (1) на первом шаге (первой итерации). При этом пренебрегаем значениями диагональных элементов, которые соответ-

ствуют передвижениям внутри транспортных районов (табл. 2 и 3).

В табл. 2 представлена матрица значений $P_i Q_j / c_{ij}^2$, чел.²/м², для опреде-

ления значения $k_{гр}$, в табл. 3 – матрица межрайонных корреспонденций (первая итерация), чел./ч.

по формуле

$$k_{гр} = \sum_i P_i / \sum_{ij} X_{ij}. \quad (3)$$

Расчет константы $k_{гр}$ производится

Табл. 2. Матрица значений $P_i Q_j / c_{ij}^2$ для определения значения $k_{гр}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		Σотпр.	$k_{гр}$
1		0,023	0,006	0,009	0,012	0,049	0,006	0,005	0,003	0,004	0,118	172	
2	0,006		0,020	0,043	0,039	0,013	0,008	0,013	0,006	0,004	0,151	221	
3	0,003	0,039		0,051	0,012	0,009	0,011	0,038	0,039	0,009	0,211	309	
4	0,009	0,170	0,103		0,114	0,036	0,059	0,240	0,057	0,019	0,808	1180	
5	0,010	0,125	0,020	0,092		0,042	0,027	0,026	0,009	0,008	0,359	525	
6	0,043	0,047	0,016	0,032	0,046		0,036	0,018	0,008	0,016	0,263	383	
7	0,006	0,031	0,021	0,059	0,034	0,042		0,058	0,020	0,024	0,295	430	
8	0,005	0,047	0,072	0,227	0,031	0,020	0,055		0,149	0,019	0,625	912	
9	0,003	0,023	0,078	0,057	0,012	0,010	0,020	0,158		0,014	0,374	547	
10	0,004	0,015	0,017	0,017	0,009	0,017	0,022	0,018	0,013		0,133	194	
	0,089	0,520	0,354	0,588	0,308	0,239	0,243	0,575	0,304	0,118	3,338	4873	1460,0

Табл. 3. Матрица межрайонных корреспонденций (первая итерация)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σотпр.	Отпр.	Δ	Δ
1		33	9	14	18	72	9	7	4	6	172	159	-13	13
2	8		29	63	57	20	12	18	8	6	221	293	72	72
3	4	57		75	18	13	15	56	57	14	309	1246	937	937
4	14	249	151		167	53	86	351	83	27	1180	805	-375	375
5	14	183	29	134		61	40	38	14	11	525	281	-244	244
6	63	68	24	46	66		53	27	12	24	383	346	-37	37
7	9	46	31	86	50	61		85	29	35	430	307	-123	123
8	7	69	106	332	45	29	80		218	28	912	541	-372	372
9	4	34	114	83	17	14	29	231		21	547	484	-63	63
10	6	22	25	25	13	25	32	27	19		194	412	217	217
Σприб.	130	759	516	858	450	348	355	840	445	172	4873			2455

По итогам первой итерации необходимо рассчитать невязки и откорректировать значения матрицы:

– расчет невязок

$$\Delta_i = P_i - \sum_j x_{ij}, \quad (4)$$

где Δ_i – невязка по отправлениям, тыс. чел./ч;

– корректировка значений матрицы

$$x'_{ij} = x_{ij} + \frac{\Delta_i}{\sum_i x_{ij}} x_{ij}, \quad (5)$$

где x'_{ij} – объем корреспонденций между районами (откорректированный), тыс. чел.

Итог расчета на второй итерации, чел./ч, представлен в табл. 4.

Табл. 4. Матрица межрайонных корреспонденций (вторая итерация)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σотпр.	Отпр.	Δ
1		31	8	13	16	67	8	7	3	6	159	159	0
2	11		38	83	76	26	15	24	11	8	293	293	0
3	18	228		303	72	54	62	225	230	55	1246	1246	0
4	9	170	103		114	36	58	239	57	19	805	805	0
5	8	98	15	72		33	21	20	7	6	281	281	0
6	57	62	21	42	60		48	24	11	21	346	346	0
7	6	33	22	61	35	43		61	20	25	307	307	0
8	4	41	63	196	27	17	48		129	16	541	541	0
9	3	30	101	74	15	13	25	204		19	484	484	0
10	12	46	53	53	27	53	68	57	41		412	412	0
Σприб.	129	737	425	897	442	342	354	862	510	174	4873		
Приб.	108	789	1698	546	236	269	208	388	328	303			
Δ	-21	52	1274	-351	-206	-73	-146	-474	-182	129			

По итогам второй итерации производится корректировка значений матрицы по прибытиям:

– расчет невязок

$$\Delta_j = Q_j - \sum_i x_{ij}, \quad (6)$$

где Δ_j – невязка по прибытиям, тыс. чел./ч;

– корректировка значений матрицы

$$x'_{ij} = x_{ij} + \frac{\Delta_j}{\sum_i x_{ij}} x_{ij}. \quad (7)$$

Итог расчета на третьей итерации, чел./ч, представлен в табл. 5.

Таким образом, невязки последовательно рассчитываются по строкам и столбцам. Эта процедура продолжается до тех пор, пока сумма невязок по модулю не будет меньше некоего минимального допуса: $\sum |\Delta| < \epsilon$.

В результате такой последовательности действий получена сбалансированная с учетом принятых допущений матрица межрайонных корреспонденций, каждый элемент которой соответствует объему передвижений пассажиров между парой транспортных районов в утренний максимальный час, чел./ч (табл. 6).

Табл. 5. Матрица межрайонных корреспонденций (третья итерация)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σотпр.	Отпр.	Δ	Δ
1		33	33	8	9	52	5	3	2	10	155	159	4	4
2	9		152	51	41	21	9	11	7	14	314	293	-21	21
3	15	244		184	38	43	37	101	148	95	905	1246	341	341
4	8	182	411		61	28	34	108	37	32	900	805	-95	95
5	6	105	61	44		26	13	9	5	10	279	281	2	2
6	48	66	85	26	32		28	11	7	37	339	346	7	7
7	5	35	88	37	19	34		27	13	43	303	307	4	4
8	3	44	251	120	14	13	28		83	29	584	541	-44	44
9	3	32	404	45	8	10	15	92		33	641	484	-157	157
10	10	50	213	32	14	41	40	26	27		454	412	-42	42
Σприб.	108	789	1698	546	236	269	208	388	328	303	4873			718
Приб.	108	789	1698	546	236	269	208	388	328	303				
Δ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				

В рассматриваемом примере понадобилось семь итераций для достижения значения суммы невязок, равной 46.

Таким образом, матрица часовых межрайонных корреспонденций, чел./ч,

имеет вид, представленный в табл. 7.

Графическое представление полученной матрицы корреспонденций приведено на рис. 2.

Табл. 6. Сбалансированная матрица межрайонных корреспонденций с указанием невязок

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σотпр.	Отпр.	Δ	Δ
1		31	39	7	9	53	5	3	2	10	159	159	0	0
2	8		158	41	36	18	8	10	6	11	296	293	-3	3
3	21	327		245	56	61	53	148	186	128	1225	1246	21	21
4	7	143	411		52	24	30	92	27	25	812	805	-7	7
5	6	98	73	41		26	13	9	4	10	279	281	1	1
6	47	61	101	24	33		29	11	6	35	346	346	0	0
7	5	32	104	34	19	34		27	11	40	307	307	0	0
8	3	36	265	99	13	12	25		65	24	543	541	-2	2
9	2	21	331	29	6	7	10	65		21	491	484	-8	8
10	9	40	216	26	13	35	35	22	20		415	412	-4	4
Σприб.	108	789	1698	546	236	269	208	388	328	303	4873			46
Приб.	108	789	1698	546	236	269	208	388	328	303				
Δ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				

Табл. 7. Сбалансированная матрица межрайонных корреспонденций

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σотпр.
1		31	39	7	9	53	5	3	2	10	159
2	8		158	41	36	18	8	10	6	11	296
3	21	327		245	56	61	53	148	186	128	1225
4	7	143	411		52	24	30	92	27	25	812
5	6	98	73	41		26	13	9	4	10	279
6	47	61	101	24	33		29	11	6	35	346
7	5	32	104	34	19	34		27	11	40	307
8	3	36	265	99	13	12	25		65	24	543
9	2	21	331	29	6	7	10	65		21	491
10	9	40	216	26	13	35	35	22	20		415
Σприб.	108	789	1698	546	236	269	208	388	328	303	4873

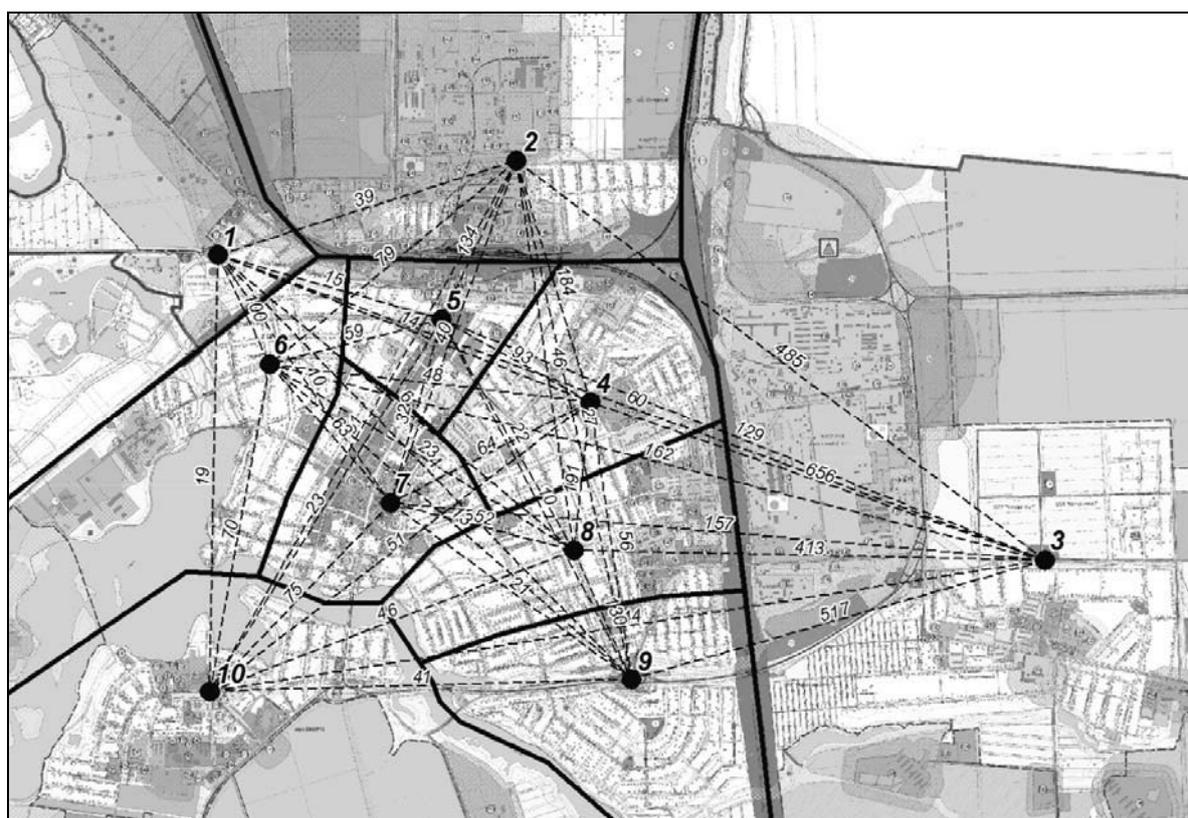


Рис. 2. Матрица межрайонных корреспонденций в утренний максимальный час в двух направлениях

Представленный энтропийный подход также может применяться при расчете матриц корреспонденций, в том числе без применения математических

моделей. Данный метод несколько сложнее, т. к. при его использовании учитывается вероятность совершения передвижений между районами в соот-

ветствии с принятой гипотезой трудового тяготения. Метод же балансировки матриц при энтропийном подходе идентичен рассмотренному выше.

Переход к среднесуточным значениям элементов матрицы межрайонных корреспонденций

Для расчета требуемого количества подвижного состава и построения картограмм интенсивности пассажиропотоков, как правило, учитываются среднесуточные показатели, позволяющие учесть все имеющиеся передвижения с учетом неравномерности по часам суток. Для перехода к среднесуточной матрице межрайонных корреспонденций, учитывающей все основные виды целевых передвижений на ГМПТ, обратимся к следующей последовательности действий.

1. Переход к суточной матрице:

$$x'_{ij} = (x_{ij} + x_{ji})/k_{\text{час}}, \quad (8)$$

где x'_{ij} – объем корреспонденций между районами (откорректированный), тыс. чел.

Поскольку суточная матрица (человек в сутки в двух направлениях) является симметричной, в отличие от часовой (предполагается, что все участники передвижений «дом – работа» во второй половине дня возвращаются домой), для простоты можно рассмотреть только половину матрицы, умножив ее значения на два (табл. 8):

$$x''_{ij} = 2x'_{ij}.$$

2. Определение доли и объема передвижений с помощью ГМПТ. Поскольку использование ГМПТ оправдано только для передвижений на расстоянии более 1,5...2 км, необходимо учесть этот фактор при расчете матрицы, элементы которой будут учитывать

лишь тех участников передвижений, которые пользуются ГМПТ (транспортные передвижения). Определение матрицы транспортных передвижений (корреспонденций) производится по следующей формуле:

$$X_{ij\text{тр}} = \varphi X_{ij}, \quad (9)$$

где $X_{ij\text{тр}}$ – матрица передвижений на ГМПТ; φ – коэффициент использования ГМПТ.

Значения коэффициентов пользования ГМПТ могут быть определены в зависимости от дальности передвижений по табл. 9 или по графикам, представленным на рис. 3. Дальность передвижений может определяться исходя из значений матрицы расстояний по прямой (по воздуху) между центроидами транспортных районов $l_{ij\text{пр}}$ (см. табл. 1).

Результаты определения коэффициентов пользования транспортом приведены в табл. 10.

Результаты расчета матрицы суточных транспортных передвижений (человек в сутки в двух направлениях) представлены в табл. 11.

3. Учет различных видов целевых передвижений. Если для расчета матрицы трудовых корреспонденций можно было пренебречь иными видами передвижений, то в суточном цикле необходимо с помощью поправочных коэффициентов учесть и другие виды передвижений, таких как деловые или культурно-бытовые.

В упрощенном виде

$$X_{ij\text{сумм}} = 2X_{ij\text{тр}}, \quad (10)$$

где $X_{ij\text{сумм}}$ – матрица передвижений на ГМПТ (с учетом всех видов целевых передвижений).

Результаты расчета (человек в сутки в двух направлениях) представлены в табл. 12.

Табл. 8. Суточная матрица межрайонных корреспонденций

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1		260	402	92	102	665	69	41	26	121	
2			3233	1230	892	529	269	307	174	339	
3				4377	858	1078	1047	2750	3451	2294	
4					619	317	425	1276	373	341	
5						389	213	148	66	149	
6							415	153	87	466	
7								353	146	501	
8									865	308	
9										274	
10											
											32490

Табл. 9. Коэффициенты пользования городским общественным транспортом

Дальность передвижений, км	До 1	1...1,5	1,5...2	2...2,5	Более 2,5
Коэффициент пользования транспортом	0,2	0,5	0,75	0,95	1

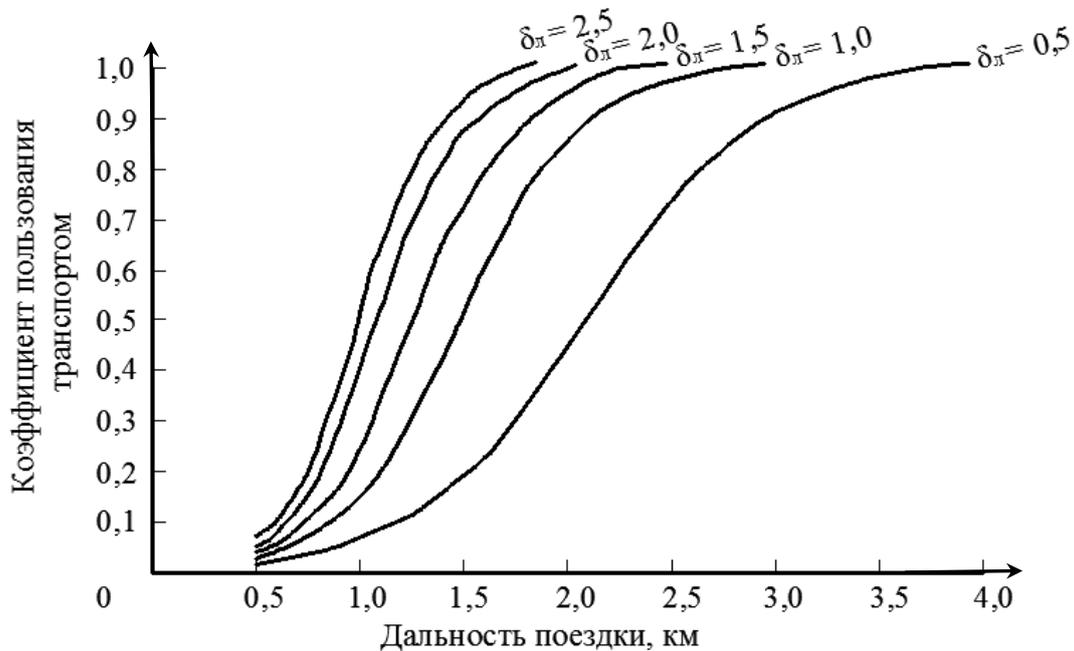


Рис. 3. График зависимости коэффициента пользования транспортом от плотности сети и дальности поездки

Табл. 10. Матрица коэффициентов пользования транспортом

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		0,95	1	1	0,75	0,2	0,95	1	1	1
2			1	0,75	0,5	0,95	1	1	1	1
3				1	1	1	1	1	1	1
4					0,5	0,95	0,75	0,5	0,95	1
5						0,5	0,5	0,95	1	1
6							0,5	1	1	1
7								0,5	0,95	0,75
8									0,5	1
9										1
10										

Табл. 11. Суточная матрица межрайонных транспортных передвижений

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1		247	402	92	76	133	66	41	26	121	
2			3233	922	446	503	269	307	174	339	
3				4377	858	1078	1047	2750	3451	2294	
4					309	302	319	638	355	341	
5						195	106	141	66	149	
6							207	153	87	466	
7								176	138	376	
8									432	308	
9										274	
10											
											28790

Табл. 12. Суточная откорректированная матрица межрайонных транспортных передвижений

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1		493	804	185	153	266	131	81	51	242	
2			6466	1845	892	1006	538	614	349	678	
3				8754	1717	2155	2094	5501	6902	4587	
4					619	603	638	1276	709	681	
5						389	213	281	132	298	
6							415	307	175	932	
7								353	277	752	
8									865	615	
9										547	
10											
											57580

Заключение

Выполнен расчет и балансировка часовой матрицы межрайонных корреспонденций на основе гравитационного подхода. Установлено, что на основе результатов расчета параметров генерации поездок («отправления» и «прибытия» в утренний максимальный час) можно рассчитать матрицу межрайонных корреспонденций [3, 9]. Вместе с тем отмечено, что данная задача не имеет однозначного решения. Показаны данные по нескольким итерациям, отражена необходимость расчета невязки и корректировки значения матрицы каждый раз для получения сбалансированной с учетом принятых допущений матрицы межрайонных корреспонденций, каждый элемент которой соответствует объему передвижений пассажиров между парой транспортных районов

в утренний максимальный час. Представленный энтропийный подход также может применяться при расчете матриц корреспонденций, в том числе без применения математических моделей. Данный метод несколько сложнее, т. к. при его использовании учитывается вероятность совершения передвижений между районами в соответствии с принятой гипотезой трудового тяготения. Также выполнен переход к среднесуточным значениям элементов матрицы межрайонных корреспонденций (при этом для расчета требуемого количества подвижного состава и построения картограмм интенсивности пассажиропотоков, как правило, учитываются среднесуточные показатели, позволяющие учесть все имеющиеся передвижения с учетом неравномерности по часам суток) по приведенному алгоритму действий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капский, Д. В. Методология повышения качества дорожного движения: монография / Д. В. Капский. – Минск: БНТУ, 2018. – 372 с.
2. Лосин, Л. А. Административно-территориальные преобразования и формирование локальных центров расселения на территории Санкт-Петербургской городской агломерации / Л. А. Лосин, В. В. Со-

лодилов, Г. П. Ляпунова // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. – 2020. – № 2 (61).

3. Транспортное моделирование и оценка условий дорожного движения с использованием навигационной информации: монография / Д. В. Капский [и др.]. – Минск: Капитал Принт, 2018. – 144 с.

4. Оценка экологических потерь в дорожном движении на основе GPS-данных о параметрах транспортных потоков и моделирования: монография / И. Н. Пугачев [и др.]. – Хабаровск: ТОГУ, 2020. – 249 с.

5. **Врубель, Ю. А.** Определение потерь в дорожном движении: монография / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.

6. Координированное управление дорожным движением: монография / Ю. А. Врубель [и др.]. – Минск: БНТУ, 2011. – 230 с.

7. **Врубель, Ю. А.** Опасности в дорожном движении: монография / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский. – Москва: Новое знание, 2013. – 244 с.

8. **Капский, Д. В.** Транспорт в планировке городов: пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»: в 10 ч. Ч. 1: Транспортное планирование: математическое моделирование / Д. В. Капский, Л. А. Лосин. – Минск: БНТУ, 2019. – 94 с.

9. Теоретические и практические аспекты организации городского движения велосипедистов: монография / Д. В. Капский [и др.]; под общ. ред. В. К. Шумчика. – Минск: Капитал Принт, 2019. – 374 с.

Статья сдана в редакцию 17 ноября 2021 года

Денис Васильевич Капский, д-р техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет.
E-mail: d.kapsky@gmail.com.

Denis Vasilyevich Kapsky, DSc (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University.
E-mail: d.kapsky@gmail.com.

DOI: 10.53078/20778481_2022_1_17

УДК 656

Д. В. Капский

ТРАНСПОРТНЫЕ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СЕТИ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА И ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ В ЦЕЛОМ

D. V. Kapisky

TRANSPORT MOVEMENT IN CONSTRUCTING URBAN PASSENGER TRANSPORT NETWORK AND TRANSPORT SYSTEM AS A WHOLE

Аннотация

Следует отметить, что проблемы городской транспортной системы очень многогранны и сложны, требуют координации усилий государственного и частного сектора экономики, который сильно фрагментирован, с разными и противоречивыми взглядами и целями, остро реагирует на изменения городской (транспортной) среды. Раскрываются подходы к исследованиям транспортных передвижений с учетом численности населения, специфики расселения граждан. Изложен новый подход к формированию исходных информационных массивов. Проведено разбиение рассматриваемой территории на транспортные районы и осуществлен прогноз численности населения по ним. Выполнен прогноз количества мест приложения труда по транспортным районам, который сопровождался расчетом параметров генерации поездок по данным районам. Определена численность самостоятельного населения по транспортным районам, а также количество отправок и прибытий по трудовым целям в утренний период (полусутки). Исходя из данных о неравномерности пассажиропотоков по часам суток определено количество отправок и прибытий в утренний максимальный час пик и получены значения «отправок» и «прибытий» по транспортным районам.

Ключевые слова:

город, устойчивость, мобильность, издержки, городской маршрутный пассажирский транспорт, транспортная система, эффективность.

Для цитирования:

Капский, Д. В. Транспортные передвижения для построения сети городского пассажирского транспорта и транспортной системы в целом / Д. В. Капский // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 17–30.

Abstract

Problems of urban transport systems are noted for being very multifaceted and complicated and they require the coordination of efforts between public and private sectors of the economy, the latter being highly fragmented with different and conflicting views and goals, and a sharp response to changes in the urban (transport) environment. The paper describes approaches to the study of transport movement, with the population and its settlement being taken into account. A new approach to the formation of initial data arrays is presented. The territory under consideration was divided into transport areas and population projections were made for them. A forecast of the number of places of employment in these transport areas was made, which was accompanied by the calculation of trip generation parameters in these areas. The number of economically active population was determined for each transport area, as well as the number of departures and arrivals for work-related purposes in the morning (half a day). Based on the data on the unevenness of passenger flows by hours of the day, the number of departures and arrivals at the peak of morning rush hour was determined, and the values of «departures» and «arrivals» for the transport area were obtained.

Keywords:

city, sustainability, mobility, costs, regular urban passenger transport, transport system, efficiency.

For citation:

Kapsky, D. V. Transport movement in constructing urban passenger transport network and transport system as a whole / D. V. Kapsky // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 17–30.

Введение

Устойчивая городская транспортная система должна сочетать институциональные механизмы, экономические меры и бюджетные ресурсы. Необходимыми условиями успешной организации такой системы являются: наличие стратегического транспортного планирования; интегрированное управление развитием и использованием дорожной сети, организацией перевозок грузов и пассажиров и дорожным движением; эффективная работа маршрутного пассажирского транспорта в условиях роста пассажиропотоков [1–3]. Одной из форм обеспечения позитивных, устойчивых транспортно-логистических процессов может являться приоритетное развитие различных видов транспорта, более эффективных в долгосрочной

перспективе и повышающих общественную ценность транспортной системы, например, приоритет коллективных и немоторизированных видов транспорта и развитие пешей активности (маршрутный пассажирский и велосипедный транспорт, средства индивидуальной мобильности) над личным транспортом, приоритет электрического и другого экологически чистого транспорта над транспортом, оснащенным двигателем внутреннего сгорания, приоритет дорогого, но более надежного подвижного состава (трамвай, троллейбус) над более дешевым, с ограниченным сроком службы (автобус, микроавтобус) (рис. 1), что скажется на изменении спроса на поездки, модели транспортного поведения в городских условиях [4, 5].



Рис. 1. Трансформация структуры передвижений в устойчивой транспортной системе

Именно поэтому важно знание текущих и моделирование возможных передвижений по городу как на среднесрочную, так и на долгосрочную перспективу с учетом трансформации транспортной среды, загрузки дорог, потребления (сокращения затрат) энергии для синергетического эффекта по снижению негативного воздействия транспорта на жителей города.

Общие подходы к формированию исходных информационных массивов

После разбиения рассматриваемой территории на транспортные районы необходимо поставить им в соответствие данные, определяющие потокообразование и потокопоглощение в сети ГМПП, т. е. рассчитать параметры генерации поездок [3, 6]. Эта процедура, первая в четырехступенчатой схеме транспортной модели, предполагает переход от численности населения, количества мест приложения труда, другой информации, характеризующей потокообразование и потокопоглощение, к «отправлениям» и «прибытиям» пассажиров в единицу времени. Хотя при построении транспортных моделей учитывается, как правило, несколько видов передвижений, предлагаемая упрощенная расчетная схема на данном этапе ограничивается только трудовыми передвижениями, т. е. передвижениями «дом – работа», являющимися наиболее значимыми в утренний максимальный час. Кроме того, именно трудовые передвижения наиболее критичны с точки зрения организации транспортных систем городов, т. к. значения затрат времени на их осуществление являются нормируемой величиной в градостроительстве. Таким образом, на первом этапе необходимо определить численность населения и количество мест приложения труда по каждому транспортному району на перспективу, соответствующую расчетному сроку генераль-

ного плана рассматриваемого города.

Прогнозирование численности населения по транспортным районам логично производить на основе информации о современном распределении населения по территории методом экстраполяции. Исходная информация по современному состоянию может быть получена на основе данных государственной статистики, данных избирательных комиссий, другой доступной официальной информации. Анализ государственных ресурсов, характеризующих распределение населения в соответствии с регистрацией по месту жительства, несмотря на кажущуюся очевидность их использования в расчетах, может привести к большой погрешности полученных результатов, особенно для районов массового жилищного строительства, где высок процент жителей, не регистрирующихся по месту фактического проживания. К большой погрешности также приводит отсутствие адекватного учета проживания в арендованной недвижимости, наличие в ряде городов большого числа временного населения и т. д. В связи с этими особенностями, а также возможными затруднениями в получении таких данных дополнительным источником информации о проживающих могут стать результаты анализа структуры жилищного фонда. Такой подход позволяет оценить плотность проживающего населения в зависимости от этажности и типологии застройки.

После распределения современного населения по транспортным районам в соответствии с вышеизложенными подходами можно спрогнозировать его будущее состояние на основе имеющихся трендов. Для учета тенденций, характерных для различных районов, поясов или планировочных направлений города, целесообразно провести зонирование территории по типу среды и характеру возможных изменений этой среды в перспективе. Так, разные пояса

городских агломераций характеризуются, как правило, различными тенденциями в динамике численности населения, что характерно для процесса субурбанизации, который наблюдается во многих городах, особенно крупных и крупнейших. В качестве исходной информационной базы для такого анализа, помимо информации о современном распределении населения, выступают данные о площади и структуре жилищного фонда, сведения о выданных разрешениях на строительство жилых домов, материалы проектов планировки территории, данные об инвестиционных намерениях и т. д. [3, 7, 8].

Процедура прогнозирования количества мест приложения труда во многом аналогична процедуре прогнозирования численности населения. Но если поиск информации о распределении населения по территории, как было указано ранее, сопряжен с определенными сложностями, то поиск информации о размещении рабочих мест еще более затруднен в силу особенностей регистрации предприятий и организаций по юридическим адресам. Кроме того, дополнительные сложности связаны со значительным числом работающих по временным трудовым договорам или по совместительству, с различным графиком работы и т. д. Поэтому даже при наличии информации о юридических и фактических адресах и численности работников по организациям уровень погрешности результатов будет очень велик [3, 9].

На практике для оценки распределения мест приложения труда (мест работы и учебы), так же как для оценки численности населения, можно воспользоваться методом экстраполяции относительно современного состояния. Поскольку рабочие места привязаны, как правило, к производственным и общественно-деловым зонам, для такой оценки необходима информация о площадях, структуре и динамике нежилого

фонда, располагающегося в этих зонах. Далее, исходя из площади нежилого фонда различного функционального назначения по транспортным районам и на основании сведений о величине площади нежилого фонда, приходящейся на одного работника, можно оценить количество рабочих мест. Отдельно при такой оценке следует рассмотреть распределение по транспортным районам мест учебы в высших и средних специальных учебных заведениях, что, как правило, не вызывает больших затруднений [3, 5, 10].

Прогноз численности населения по транспортным районам

Рассмотрим упрощенную схему прогнозирования численности населения по транспортным районам, основанную на анализе функциональной структуры города, задаваемой генеральным планом; преимуществом такого подхода является отсутствие необходимости в предварительном определении современных показателей территориального размещения населения. Численность населения зависит, в первую очередь, от плотности, которая, в свою очередь, определяется типом жилой застройки, определяемой схемой функционального зонирования в составе генерального плана города. Рассмотрим три типа жилой застройки (под жилой застройкой подразумевается как существующая, так и предполагаемая к размещению в соответствии с генеральным планом, т. е. допускается, что проектные решения генерального плана будут полностью реализованы к расчетному сроку), каждый из которых характеризуется своим значением средней плотности населения. Значения средней плотности могут присутствовать в материалах генерального плана города, но в первом приближении их можно принять по данным табл. 1.

На следующем этапе необходимо

выделить зоны жилой застройки в соответствии с принятой типологией (рис. 2) во взаимосвязи с системой транспортного районирования. Важно, чтобы гра-

ницы выделяемых зон не пересекали границы транспортных районов; в таких случаях территории зон необходимо разбивать по этим границам.

Табл. 1. Рекомендуемые значения плотности населения по функциональным зонам

Функциональная зона	Средняя плотность населения, чел./га
Зона средне- и многоэтажной жилой застройки	300
Зона малоэтажной жилой застройки	100
Зона усадебной застройки	20

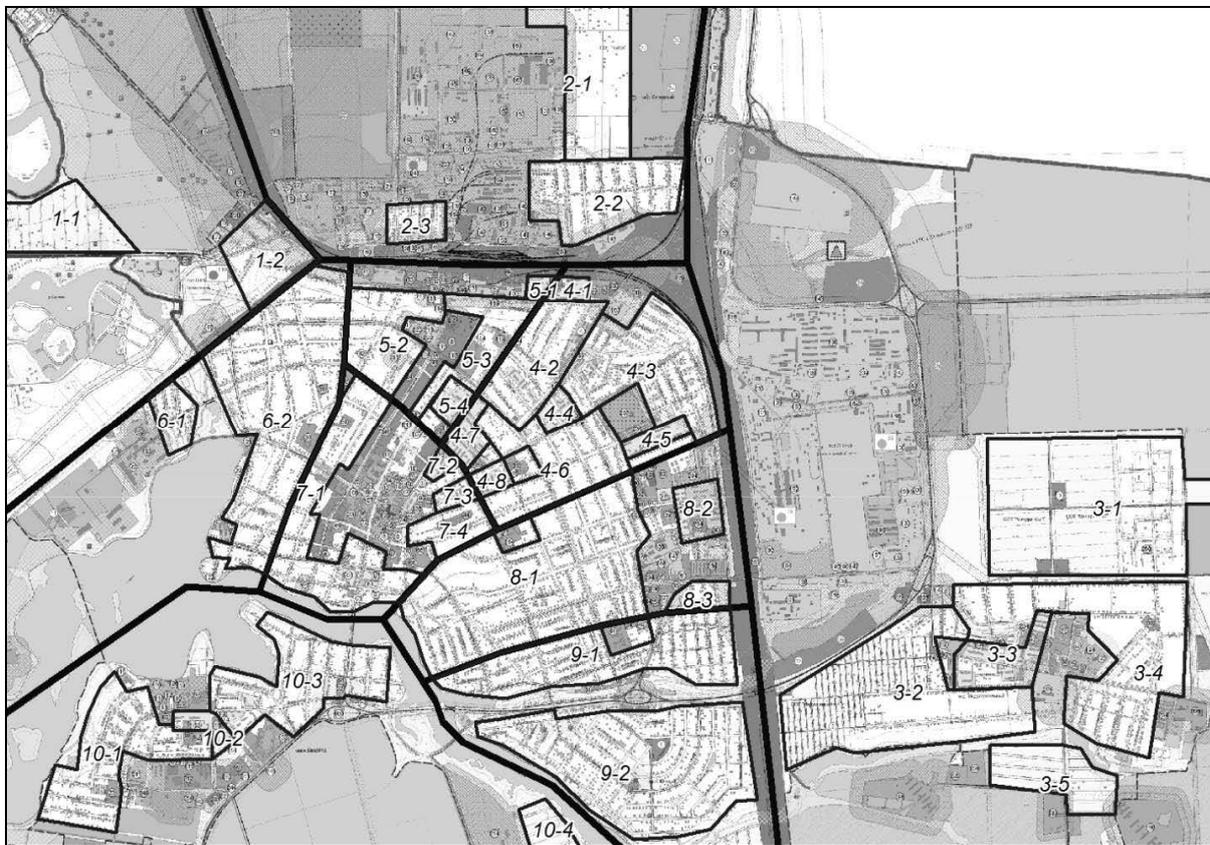


Рис. 2. Размещение жилых зон

Численность населения может быть получена по следующей формуле:

$$N_i = \delta_n S_i, \quad (1)$$

где N_i – численность населения в районе (зоне) i , тыс. жителей; δ_n – плотность

населения, тыс. жителей/км²; S_i – площадь района (зоны) i , км².

Площадь каждой зоны рассчитывается по материалам генерального плана с учетом масштаба чертежа. Полученные результаты расчета представлены в табл. 2.

Табл. 2. Расчет численности населения по транспортным районам

Транспортный район	Номер зоны жилой застройки	Тип застройки	Площадь, га	Плотность, чел./га	Население, чел.
1	1-2	Усадебная	37,90	20	758
1	1-1	Усадебная	31,79	20	636
2	2-1	Усадебная	60,70	20	1214
2	2-2	Усадебная	54,92	20	1098
2	2-3	Усадебная	12,91	20	258
3	3-1	Усадебная	153,39	20	3068
3	3-2	Усадебная	121,97	20	2439
3	3-3	Малоэтажная	22,91	100	2291
3	3-4	Усадебная	114,32	20	2286
3	3-5	Усадебная	33,06	20	661
4	4-1	Малоэтажная	4,97	100	497
4	4-2	Усадебная	44,37	20	887
4	4-3	Усадебная	71,08	20	1422
4	4-4	Малоэтажная	6,71	100	671
4	4-5	Малоэтажная	7,03	100	703
4	4-6	Усадебная	53,78	20	1076
4	4-7	Малоэтажная	9,77	100	977
4	4-8	Малоэтажная	5,58	100	558
5	5-1	Малоэтажная	2,98	100	298
5	5-2	Усадебная	39,26	20	785
5	5-3	Усадебная	30,04	20	601
5	5-4	Малоэтажная	6,99	100	699
6	6-1	Усадебная	12,62	20	252
6	6-2	Усадебная	139,23	20	2785
7	7-1	Усадебная	71,16	20	1423
7	7-2	Малоэтажная	3,59	100	359
7	7-3	Малоэтажная	5,16	100	516
7	7-4	Усадебная	16,34	20	327
8	8-1	Усадебная	154,82	20	3096
8	8-2	Малоэтажная	13,68	100	1368
8	8-3	Усадебная	8,43	20	169
9	9-1	Усадебная	76,53	20	1531
9	9-2	Усадебная	135,52	20	2710
10	10-1	Усадебная	62,29	20	1246
10	10-2	Малоэтажная	7,58	100	758
10	10-3	Усадебная	64,46	20	1289
10	10-4	Усадебная	12,83	20	257
Итого					41969
По генеральному плану					49200

Просуммировав значения численности населения по всем транспортным районам, можно сравнить полученное значение с проектным показателем численности населения, определенным генеральным планом города (эти сведения приведены в технико-экономических показателях текстовой части генераль-

ного плана). В большинстве случаев расчетная сумма численности населения не совпадает с данными генерального плана, поэтому на следующем этапе необходимо путем корректировки значений плотности достичь совпадения расчетных значений с показателями генерального плана (табл. 3).

Табл. 3. Корректировка численности населения по транспортным районам

Транспортный район	Номер зоны жилой застройки	Тип застройки	Площадь, га	Плотность, чел./га	Население, чел.
1	1-2	Усадебная	37,90	23	872
1	1-1	Усадебная	31,79	23	731
Итого по району					1603
2	2-1	Усадебная	60,70	23	1396
2	2-2	Усадебная	54,92	23	1263
2	2-3	Усадебная	12,91	23	297
Итого по району					2956
3	3-1	Усадебная	153,39	23	3528
3	3-2	Усадебная	121,97	23	2805
3	3-3	Малоэтажная	22,91	124	2841
3	3-4	Усадебная	114,32	23	2629
3	3-5	Усадебная	33,06	23	760
Итого по району					12564
4	4-1	Малоэтажная	4,97	124	616
4	4-2	Усадебная	44,37	23	1021
4	4-3	Усадебная	71,08	23	1635
4	4-4	Малоэтажная	6,71	124	832
4	4-5	Малоэтажная	7,03	124	872
4	4-6	Усадебная	53,78	23	1237
4	4-7	Малоэтажная	9,77	124	1211
4	4-8	Малоэтажная	5,58	124	692
Итого по району					8116
5	5-1	Малоэтажная	2,98	124	370
5	5-2	Усадебная	39,26	23	903
5	5-3	Усадебная	30,04	23	691
5	5-4	Малоэтажная	6,99	124	867
Итого по району					2830
6	6-1	Усадебная	12,62	23	290

Окончание табл. 3

Транспортный район	Номер зоны жилой застройки	Тип застройки	Площадь, га	Плотность, чел./га	Население, чел.
6	6-2	Усадебная	139,23	23	3202
Итого по району					3493
7	7-1	Усадебная	71,16	23	1637
7	7-2	Малоэтажная	3,59	124	445
7	7-3	Малоэтажная	5,16	124	639
7	7-4	Усадебная	16,34	23	376
Итого по району					3097
8	8-1	Усадебная	154,82	23	3561
8	8-2	Малоэтажная	13,68	124	1696
8	8-3	Усадебная	8,43	23	194
Итого по району					5451
9	9-1	Усадебная	76,53	23	1760
9	9-2	Усадебная	135,52	23	3117
Итого по району					4877
10	10-1	Усадебная	62,29	23	1433
10	10-2	Малоэтажная	7,58	124	940
10	10-3	Усадебная	64,46	23	1482
10	10-4	Усадебная	12,83	23	295
Итого по району					4150
Итого					49137
По генеральному плану					49200

По результатам расчетов значения численности населения по транспортным районам сведены в табл. 4.

Прогноз количества мест приложения труда по транспортным районам

В предлагаемой упрощенной схеме расчета количества мест приложения труда все рабочие места подразделяются на две большие группы – рабочие места в производственной и непроизводственной сферах. Суммарная проектная численность занятых по каждой из этих групп приведена либо в генеральном плане, либо в документах, определяющих социально-экономическое развитие

города, – в этих источниках можно найти сведения об отраслевой структуре занятости с указанием численности рабочих мест. Характер распределения по территории каждой из этих групп разный. Так, рабочие места в производственной сфере можно распределить пропорционально площади производственных зон, заданных генеральным планом, т. е. задача этого распределения во многом аналогична распределению населения по жилым зонам. Рабочие места в непроизводственной сфере (торговля, сфера услуг, общественное питание, образование, здравоохранение, научная сфера, социальная сфера, жилищно-коммунальное хозяйство и т. д.) можно распределить пропорционально

размещению самого населения. Схема расчета распределения рабочих мест в соответствии с изложенными подходами приведена в табл. 5 и 6, схема расчета площадей, занятых производственными зонами, определенными генеральным планом, представлена на рис. 3 (предлагаемый расчет мест

приложения труда ограничен только рабочими местами; учебные места в высших и средних специальных заведениях не учитываются).

По результатам расчетов полученные значения количества мест приложения труда по транспортным районам сведены в табл. 7.

Табл. 4. Прогнозные значения численности населения по транспортным районам

Транспортный район	Население, чел.
1	1603
2	2956
3	12564
4	8116
5	2830
6	3493
7	3097
8	5451
9	4877
10	4150
Итого	49137

Табл. 5. Расчет мест приложения труда в непроизводственной сфере по транспортным районам

Транспортный район	Население, чел.	Рабочие места в непроизводственной сфере, ед.
1	1603	633
2	2956	1167
3	12564	4960
4	8116	3204
5	2830	1117
6	3493	1379
7	3097	1223
8	5451	2152
9	4877	1926
10	4150	1638
Итого	49137	19400

Табл. 6. Расчет мест приложения труда в производственной сфере по транспортным районам

Транспортный район	Площадь производственных зон, га	Рабочие места в производственной сфере, ед.
1	0	0
2	207,83	3463
3	300,48	5006
4	0	0
5	16,07	268
6	11,9	198
7	0	0
8	7,33	122
9	0	0
10	8,56	143
Итого	552,17	9200

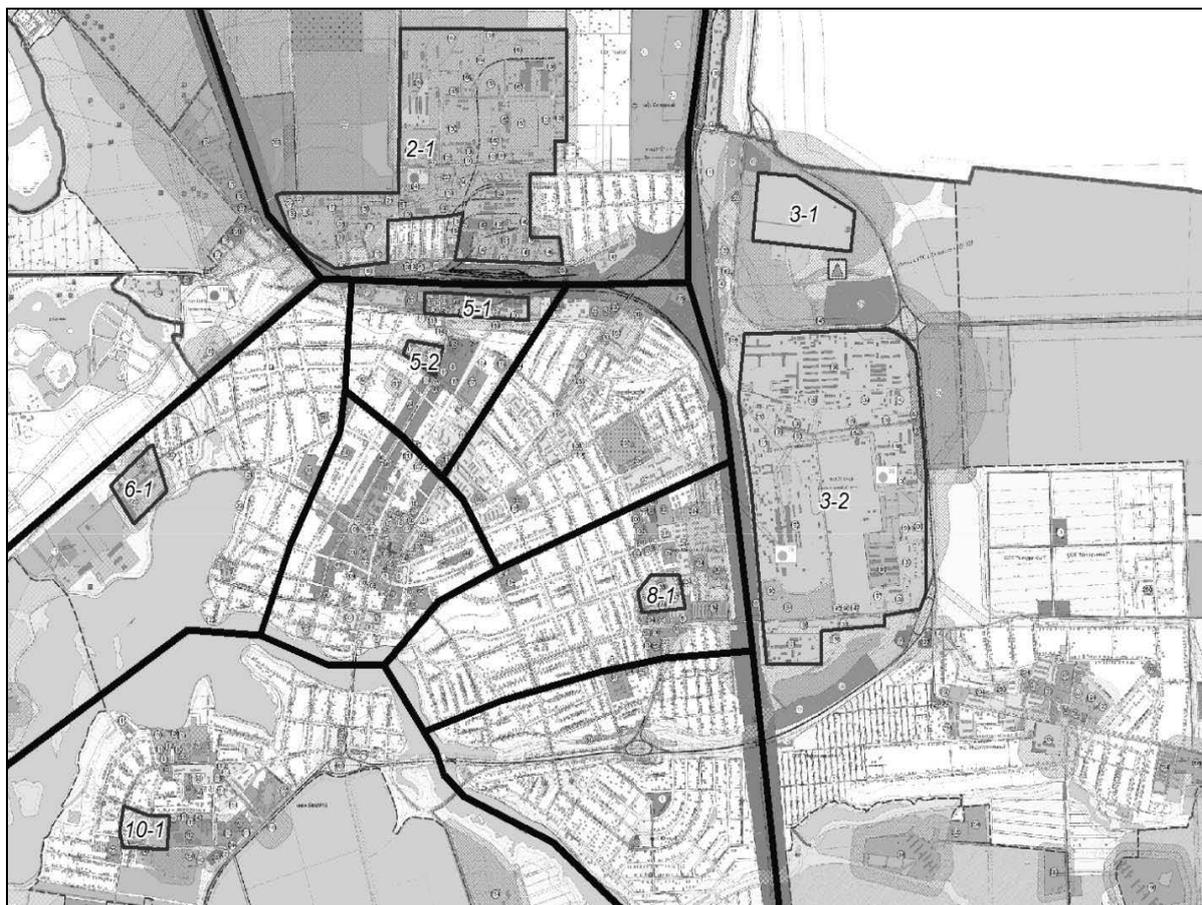


Рис. 3. Размещение производственных зон

Табл. 7. Прогнозные значения количества мест приложения труда по транспортным районам

Транспортный район	Рабочие места в непроизводственной сфере, ед.	Рабочие места в производственной сфере, ед.	Итого рабочих мест, ед.
1	633	0	633
2	1167	3463	4630
3	4960	5006	9967
4	3204	0	3204
5	1117	268	1385
6	1379	198	1577
7	1223	0	1223
8	2152	122	2274
9	1926	0	1926
10	1638	143	1781
Итого	19400	9200	28600

Расчет параметров генерации поездок по транспортным районам

Параметры генерации поездок могут быть рассчитаны исходя из прогнозных показателей уровня подвижности населения. Но для избежания сложных расчетов по прогнозированию подвижности можно воспользоваться расчетной схемой, основанной на разделении всех участников передвижения на две группы – передвигающихся на индивидуальном и маршрутном пассажирском

транспорте. При таком подходе, зная прогнозный уровень автомобилизации населения и другие параметры, характеризующие транспортное поведение, можно отделить из всего населения часть пользующихся индивидуальным транспортом при трудовых передвижениях. Затем необходимо привести показатели «отправлений» и «прибытий» к выбранному временному диапазону – в данном случае к утреннему максимальному часу (табл. 8).

Табл. 8. Расчет параметров генерации поездок по транспортным районам

Транспортный район	Население, чел.	Самодетельное население, чел.	Количество мест приложения труда, ед.	Уровень автомобилизации, авт./1000 жителей	Коэффициент использования автотранспорта	Коэффициент средней наполняемости	Отправления в утренний период, чел.	Прибытия в утренний период, чел.	Отправления в утренний максимальный час, чел.	Прибытия в утренний максимальный час, чел.
1	1603	933	633	400	0,80	1,35	530	359	159	108
2	2956	1720	4630	400	0,80	1,35	977	2630	293	789
3	12564	7312	9967	400	0,80	1,35	4153	5661	1246	1698
4	8116	4724	3204	400	0,80	1,35	2683	1820	805	546
5	2830	1647	1385	400	0,80	1,35	936	787	281	236
6	3493	2033	1577	400	0,80	1,35	1155	896	346	269
7	3097	1802	1223	400	0,80	1,35	1024	695	307	208
8	5451	3172	2274	400	0,80	1,35	1802	1292	541	388
9	4877	2838	1926	400	0,80	1,35	1612	1094	484	328
10	4150	2415	1781	400	0,80	1,35	1372	1012	412	303
Итого	49137	28598	28600						4873	4873

Согласно табл. 8 имеем следующее.

1. Численность населения и количество мест приложения труда получены из табл. 4 и 7.

2. Самодеятельное население – население, участвующее в ежедневных трудовых передвижениях. Доля самодеятельного населения в целом по городу определяется по формуле

$$k_{\text{сам}} = M/N, \quad (2)$$

где M – суммарное количество мест приложения труда, тыс. мест; N – суммарная численность населения, тыс. жителей.

Численность самодеятельного населения по транспортным районам определяется по формуле

$$N_{i\text{сам}} = N k_{\text{сам}}, \quad (3)$$

где $N_{i\text{сам}}$ – численность самодеятельного населения в транспортном районе i , тыс. жителей; N_i – численность населения в транспортном районе i , тыс. жителей.

3. Количество отправлений и прибытий по трудовым целям в утренний период (полусутки) рассчитывается по формулам

$$P_{i\text{утр}} = N_{i\text{сам}} \left(1 - \frac{A}{10000} k_{\text{исп}} k_{\text{нап}} \right); \quad (4)$$

$$Q_{i\text{утр}} = M_i \left(1 - \frac{A}{10000} k_{\text{исп}} k_{\text{нап}} \right), \quad (5)$$

где $P_{i\text{утр}}$ – объем отправлений из транспортного района i в утренний период, тыс. чел.; $Q_{i\text{утр}}$ – объем прибытий в транспортный район i в утренний период, тыс. чел.; A – уровень автомоби-

лизации населения, авт. на 1000 жителей; $k_{\text{исп}}$ – коэффициент использования автотранспорта; $k_{\text{нап}}$ – коэффициент средней наполняемости автотранспорта.

4. Прогнозное значение уровня автомобилизации населения может быть принято на основе информации генерального плана либо, при отсутствии таких данных, на основе прогноза динамики этого показателя или нормативных значений.

5. Коэффициент использования автотранспорта и коэффициент средней наполняемости могут быть приняты на основе средних показателей, соответствующих ситуации в рассматриваемом городе. Основываясь на имеющихся данных исследований, эти значения можно принять: $k_{\text{исп}} = 0,8$; $k_{\text{нап}} = 1,35$.

6. Количество отправлений и прибытий в утренний максимальный час рассчитывается исходя из данных о неравномерности пассажиропотоков по часам суток:

$$P_i = P_{i\text{утр}} k_{\text{утр}}; \quad (6)$$

$$Q_i = Q_{i\text{утр}} k_{\text{утр}}, \quad (7)$$

где P_i – объем отправлений из транспортного района i в утренний максимальный час, тыс. чел.; Q_i – объем прибытий в транспортный район i в утренний максимальный час, тыс. чел.; $k_{\text{утр}}$ – доля часа в утреннем периоде (полусутках).

Основываясь на имеющихся данных исследований, значение коэффициента $k_{\text{утр}}$ можно принять равным 0,3.

Для дальнейших расчетов полученные значения «отправлений» и «прибытий» по транспортным районам сведены в табл. 9.

Табл. 9. Значения «отправлений» и «прибытий» по транспортным районам

Транспортный район	Отправления в утренний максимальный час, чел.	Прибытия в утренний максимальный час, чел.
1	159	108
2	293	789
3	1246	1698
4	805	546
5	281	236
6	346	269
7	307	208
8	541	388
9	484	328
10	412	303
Итого	4873	4873

Заключение

Изложен новый подход к формированию исходных информационных массивов. Проведено разбиение рассматриваемой территории на транспортные районы и осуществлен прогноз численности населения по ним. Выполнен прогноз количества мест приложения труда по транспортным районам, который сопровождался расчетом параметров генерации поездок по данным районам.

Определена численность самостоятельного населения по транспортным районам, а также количество отправок и прибытий по трудовым целям в утренний период (полусутки). Исходя из данных о неравномерности пассажиропотоков по часам суток определено количество отправок и прибытий в утренний максимальный час пик и получены значения «отправлений» и «прибытий» по транспортным районам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Comi, A.** Exploring the relationships between e-shopping attitudes and urban freight transport / A. Comi, A. Agostino Nuzzolo // *Transportation Research Procedia*. – 2015. – Vol. 12. – P. 399–412.
2. **Russo, F.** Investigating the Effects of City Logistics Measures on the Economy of the City / F. Russo, A. Comi // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, № 4. – P. 717–728.
3. **Капский, Д. В.** Методология повышения качества дорожного движения: монография / Д. В. Капский. – Минск: БНТУ, 2018. – 372 с.
4. **Овечников, Е. В.** Городской транспорт: учебное пособие для вузов / Е. В. Овечников, М. С. Фишельсон. – Москва: Высшая школа, 1976. – 352 с.
5. **Лосин, Л. А.** Административно-территориальные преобразования и формирование локальных центров расселения на территории Санкт-Петербургской городской агломерации / Л. А. Лосин, В. В. Солодилов, Г. П. Ляпунова // *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*. – 2020. – № 2 (61). – С. 33–46.

6. Транспортное моделирование и оценка условий дорожного движения с использованием навигационной информации: монография / Д. В. Капский [и др.]. – Минск: Капитал Принт, 2018. – 144 с.

7. **Капский, Д. В.** Транспорт в планировке городов: пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»: в 10 ч. Ч. 1: Транспортное планирование: математическое моделирование / Д. В. Капский, Л. А. Лосин. – Минск: БНТУ, 2019. – 94 с.

8. Теоретические и практические аспекты организации городского движения велосипедистов: монография / Д. В. Капский [и др.]; под общ. ред. В. К. Шумчика. – Минск: Капитал Принт, 2019. – 374 с.

9. Синергия подходов к совершенствованию интеллектуальных транспортных систем городов в России и Белоруссии: монография / И. Н. Пугачев [и др.]. – Хабаровск: ТОГУ, 2020. – 230 с.

10. Оценка экологических потерь в дорожном движении на основе GPS-данных о параметрах транспортных потоков и моделирования: монография / И. Н. Пугачев [и др.]. – Хабаровск: ТОГУ, 2020. – 249 с.

Статья сдана в редакцию 17 ноября 2021 года

Денис Васильевич Капский, д-р техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет.
E-mail: d.kapsky@gmail.com.

Denis Vasilyevich Kapsky, DSc (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University.
E-mail: d.kapsky@gmail.com.

DOI: 10.53078/20778481_2022_1_31

УДК 621.9.044

М. П. Кульгейко, Н. М. Симанович, Г. С. Кульгейко

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СОВМЕЩЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ

М. P. Kulgeyko, N. M. Simanovich, G. S. Kulgeyko

ON THE POSSIBILITY OF USING THE COMBINED TECHNOLOGY OF MAGNETOELECTRIC PROCESSING TECHNIQUES

Аннотация

В работе представлен вариант исполнения технологического модуля для совмещенной магнитно-электрической обработки. Предложенное техническое решение позволяет реализовать в одном устройстве (совмещение в пространстве) процесс магнитно-абразивной обработки и магнитно-электрического упрочнения. При этом оба процесса могут осуществляться одновременно (совмещение во времени) с достижением синергетического эффекта, что обеспечивает повышение эффективности технологии формирования поверхностного слоя обрабатываемой детали с заданными свойствами.

Ключевые слова:

совмещенные технологии, технологический модуль, магнитно-абразивная обработка, магнитно-электрическое упрочнение.

Для цитирования:

Кульгейко, М. П. К вопросу о возможности реализации совмещенной технологии магнитно-электрических способов обработки / М. П. Кульгейко, Н. М. Симанович, Г. С. Кульгейко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 31–38.

Abstract

The paper presents the version of the technological module for combined magnetoelectric processing. The proposed technical solution makes it possible to realize the process of magnetic-abrasive treatment and magnetoelectric hardening in one device (by combining in space). Furthermore, the two processes can be carried out simultaneously (by combining in time), thus achieving a synergistic effect, which provides an increase in the efficiency of the technology used for forming a surface layer of the workpiece with specified properties.

Keywords:

combined technologies, technological module, magnetic-abrasive treatment, magnetoelectric hardening.

For citation:

Kulgeyko, M. P. On the possibility of using the combined technology of magnetoelectric processing techniques / M. P. Kulgeyko, N. M. Simanovich, G. S. Kulgeyko // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 31–38.

Введение

В настоящее время одним из главных и основополагающих методологических подходов к созданию современных технологий является принцип совмещенности [1]. Совмещение отдельных процессов обработки – важный

фактор повышения эффективности производства за счет сокращения длительности производственного цикла, числа рабочих мест, уменьшения количества необходимых процессов и операций. Вместе с тем, совмещенность технологий направлена на решение проблем создания качественно новых объектов, из-

делий с заданными функциональными свойствами.

Реализация принципа совмещенности предполагает не просто объединение объектов или только суммирование выполняемых ими функций. Речь идет о совмещенности выполнения функций объектами во времени и в пространстве при сокращении их общего количества. Это достигается за счет эффекта совместного действия, т. е. синергетического эффекта. И в этом смысле принцип совмещенности является методологической основой не только создания, но и развития техники и технологии [1].

Постановка задачи

Совмещенные технологии позволяют осуществлять на одном рабочем месте разнохарактерные процессы за счет совмещения их функциональных назначений. Это возможно в условиях преемственности и взаимосвязанности технологий. К таким технологиям относятся, в частности, магнитно-электрические процессы обработки [2].

Магнитно-электрические способы обработки представляют собой комплекс взаимосвязанных технологий, характеризующихся рядом общих условий их реализации, т. к. они базируются на использовании одних и тех же энергетических факторов: магнитного поля, электрического тока и механического силового воздействия. Магнитно-абразивную обработку (МАО) и магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) можно проводить на одном и том же оборудовании [3], т. к. в обоих процессах силовым источником и упругой инструментальной связкой является энергия магнитного поля. При этом магнитное поле оказывает непосредственное влияние на материал детали, на структурные и фазовые превращения в поверхностном слое, на физико-механические и эксплуатационные свойства поверхности [3–6]. При различной роли электрической и механической энергии

(первая имеет определяющее значение при МЭУ, а вторая – при МАО) они обе имеют место в процессах реализации технологии. В обоих процессах могут применяться одни и те же порошковые ферроабразивные материалы [7–9], т. е. ферромагнитные абразивы для чистовой обработки деталей могут использоваться для формирования упрочняющих покрытий. Очевидная взаимосвязанность магнитно-электрических технологий позволяет на их основе реализовать различные технологические направления генерации поверхностей деталей [2].

Таким образом, совмещенность способов магнитно-электрической обработки (МЭО) основывается на общности энергетических факторов процессов, их технического и технологического оснащения, а также соответствующих условий их реализации. Здесь важным является не только непрерывность, преемственность и взаимосвязанность технологий, но и свойство инверсионности факторов и параметров процессов обработки. Достоинства и преимущества совмещенной магнитно-электрической обработки с максимальной эффективностью можно обеспечить при реализации процессов на одном оборудовании, в одном технологическом комплексе.

Цель работы – разработка технологического модуля реализации процесса совмещенной технологии магнитно-электрической обработки.

Основная часть

Схема модуля совмещенной технологии магнитно-электрической обработки представлена на рис. 1. В представленном устройстве сердечник 1 электромагнита установлен с возможностью вращения в катушке 2. Совместно с сердечником вращается диэлектрическая втулка 3 с коллектором 4. Через коллектор 4 и ось 5 сердечника с помощью скользящих контактов 6 и 7 в зону обработки подается электрический ток.

Ферроабразивный порошок подается в рабочий зазор между деталью и торцом полюсного наконечника. Величина ра-

бочего зазора поддерживается с помощью диэлектрического шарика 8.

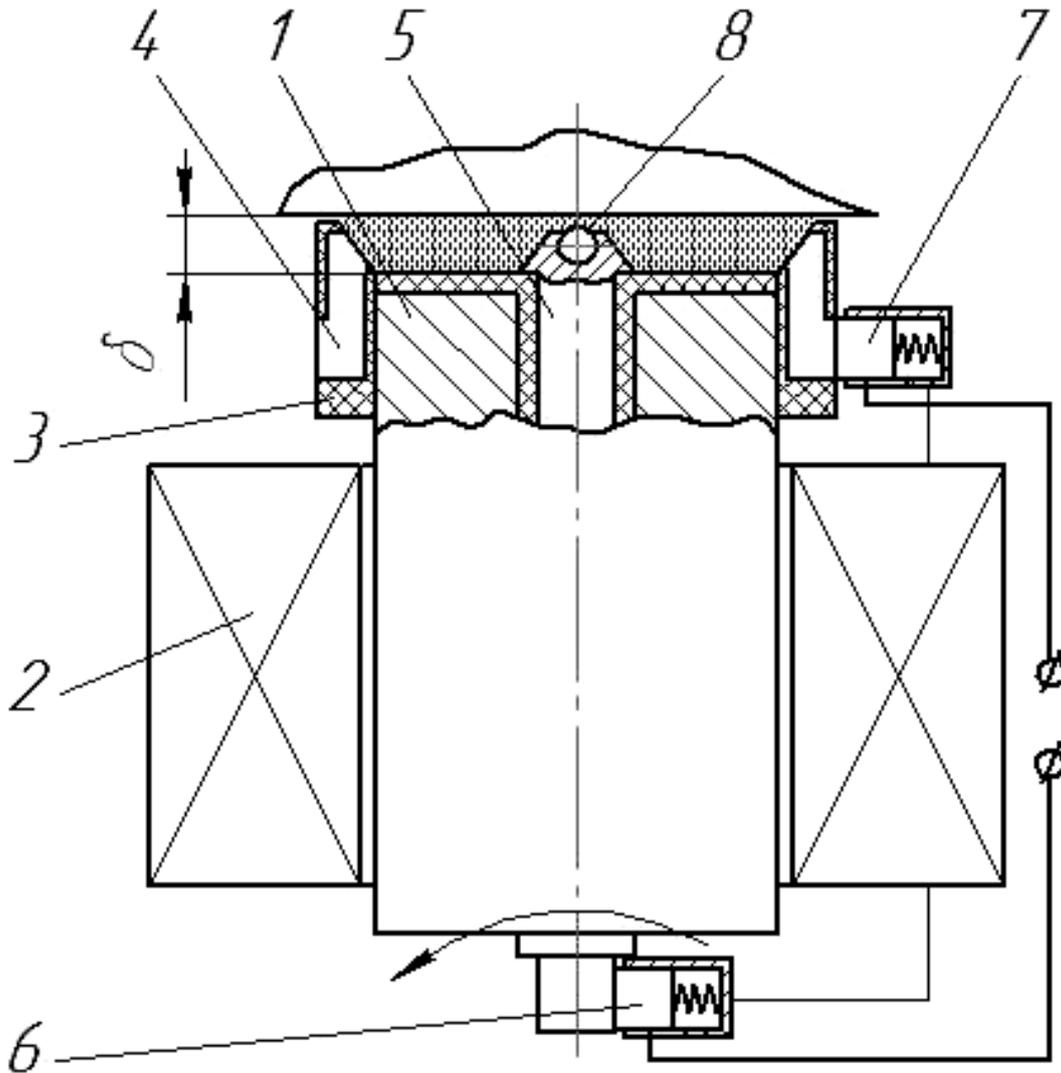


Рис. 1. Модуль совмещенной магнитно-электрической обработки

При работе модуля сердечник электромагнита 1 приводится во вращение, а обрабатываемой детали сообщаются необходимые рабочие движения. Ферромагнитный порошок, расположенный на торце сердечника и охваченный внутренней поверхностью втулки 3, образует жестко-эластичную щетку, которая вращается совместно с полюсным наконечником. При этом шарик 8 наконечника 5 контактирует с обрабаты-

мой поверхностью, свободно вращаясь в гнезде наконечника и обкатываясь по поверхности детали, и поддерживает необходимый рабочий зазор δ для размещения порошка. От объема порошка и размеров рабочей области зависит степень уплотнения порошковой массы, что, в свою очередь, наряду с некоторыми другими факторами (характеристикой магнитного поля, магнитными свойствами материала порошка и т. п.),

определяет жесткость порошкового инструмента.

Через порошковую массу пропускают электрический ток заданной величины в пределах до 150 А, замыкая цепь от источника электрического тока посредством двух скользящих контактов 6 и 7 через наконечник 5 и коллектор 4. Электроизоляционное термостойкое покрытие, выполненное на торце сердечника, предотвращает замыкание электрической цепи через сердечник, предохраняя его от оплавления. Плотность тока, проходящего через ферроабразивный порошок, зависит от площади соответствующего сечения рабочей зоны и степени ее заполнения зернами ферропорошка.

Векторная схема процесса изображена на рис. 2. Электрический ток подается через ферромагнитный порошок в объеме, охваченном сектором

с углом α . Величина сектора пропускания тока определяется количеством замкнутых в электрическую цепь пластин коллектора, т. е. $\alpha = 2\pi t/n$, где t – количество замкнутых пластин коллектора, n – общее количество пластин коллектора. За счет изменения количества замыкаемых в электрическую цепь пластин коллектора можно изменять угол α сектора пропускания тока, выбирая его величину от 0 до 2π . Таким образом, при отсутствии электрического тока происходит процесс магнитно-абразивной обработки, а при пропускании тока соответствующей величины через весь объем порошка осуществляется процесс магнитно-электрического упрочнения. В промежуточных вариантах реализуется комбинированная обработка, совмещающая в определенном соотношении оба процесса.

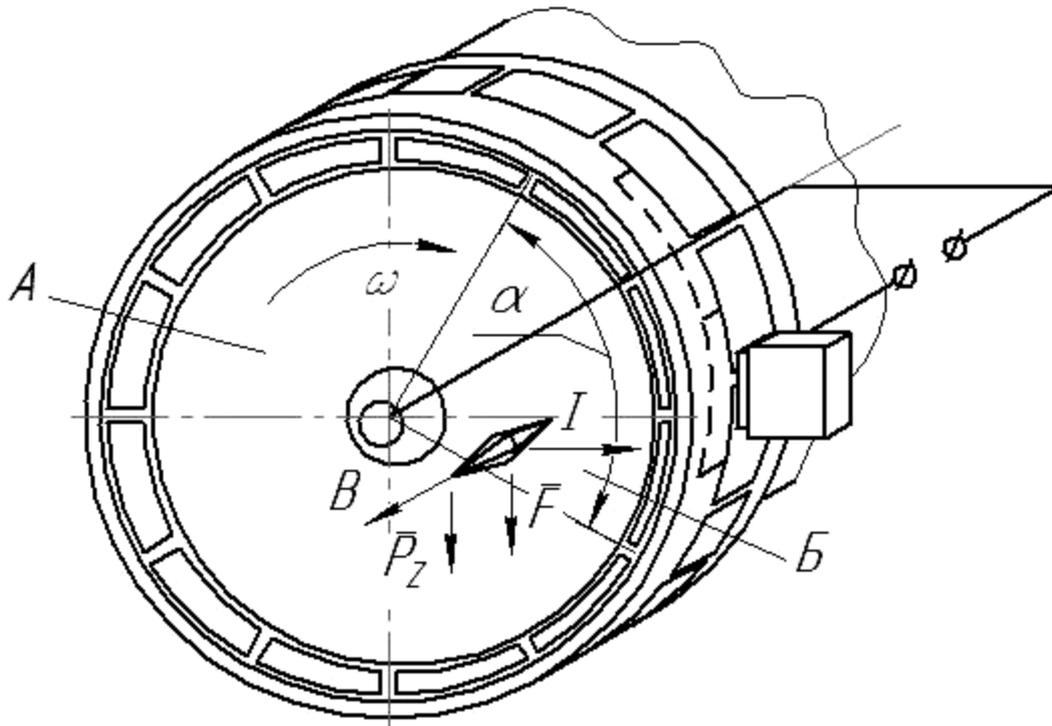


Рис. 2. Векторная схема процесса совмещенной магнитно-электрической обработки

Например, в условиях, представленных на рис. 2, через сектор α , охватывающий три пластины коллектора,

проходит электрический ток. В результате порошок, вращающийся совместно с сердечником электромагнита, перио-

дически проходит зону A без тока (сектор в $2\pi - \alpha$ радиан) и зону B пропускания тока (сектор в α радиан). Следовательно, в зоне A порошок осуществляет процесс абразивного микрорезания и пластического деформирования, интенсивность которого определяется силами резания, и в первую очередь тангенциальной составляющей P_z , величина которой, в свою очередь, определяется силами магнитного поля.

В рабочей области пропускания тока (зона B) частицы порошка представляют собой проводники с током в магнитном поле, на которые в соответствии с законом Ампера действует возникающая магнитная сила F (см. рис. 2). При этом направление вращения сердечника и электрического тока выбирается таким образом, чтобы вектор силы F был коллинеарен вектору линейной скорости порошка и, следовательно, вектору составляющей P_z силы резания, действующей на обрабатываемую поверхность. В результате в зоне B увеличивается сила воздействия порошка на обрабатываемую поверхность, которая складывается из двух составляющих, одна из которых определяется силами магнитного поля, действующими на ферромагнитное тело (порошок), а вторая составляющая представляет собой пондеромоторную силу, действующую на проводник (частицы порошка) с током в магнитном поле. Таким образом, в зоне пропускания тока увеличивается интенсивность процесса микрорезания, что способствует повышению производительности процесса MAO.

При пропускании тока до 10...15 А выделенное тепло разогревает поверхность детали и оплавляет вершины микровыступов обрабатываемой поверхности. В результате нагрева происходит разупрочнение границ зерен обрабатываемого материала, снижаются прочностные свойства поверхностного слоя. Это способствует интенсификации съема материала, в первую очередь с вершин микровыступов, и их сглажива-

нию. Следует отметить, что в [6, 10, 11] определенная роль в интенсификации процесса MAO и улучшении физико-механических свойств обработанной поверхности отводится электрическим токам. С целью интенсификации процесса диспергирования материала и выглаживания микрорельефа формируемой поверхности при тонкой финишной обработке под руководством автора [6] были предложены способы и устройства MAO с наложением электрического тока на зону обработки.

При увеличении силы тока до 40...50 А выделенное тепло, наряду с оплавлением микровыступов обрабатываемой поверхности, нагревает и оплавляет кромки ферромагнитного порошка. В результате происходят проникновение элементов материала порошка в поверхностный слой детали, адсорбция поверхностью детали ионов и атомов ферропорошка. Осуществляется процесс легирования поверхности детали химическими элементами, находящимися в составе порошка. При этом происходит упрочнение поверхности без существенного изменения размеров, что соответствует «мягкому» режиму электроискрового упрочнения [12, 13]. Так как одновременно происходит и процесс обработки, т. е. с поверхности детали удаляются окислы, то образуется так называемая ювенильная поверхность [7], или по терминологии, используемой в технологической практике, – «чистый металл» [14]. Это способствует интенсификации процесса диффузии химических элементов.

Дальнейшее увеличение силы тока до 100...140 А [3] приводит к интенсивному выделению тепла в зоне обработки, расплавлению зерен ферромагнитного порошка и оплавлению поверхности детали. Образовавшиеся капли расплава совместным действием электрического и магнитного полей ускоряются и наносятся на обрабатываемую поверхность. В результате, наряду с процессом диффузии химических элемен-

тов, происходит наращивание поверхности детали с увеличением ее размеров за счет материала порошка. Таким образом, по сути, осуществляется выход на режим электромагнитной наплавки, т. е. реализуется технология магнитно-электрического упрочнения.

В многоэлектродной системе, образованной уплотненными частицами ферропорошка, взаимное влияние дуговых разрядов способствует нагреву и плавлению порошка. Однако при малой силе разрядного тока (по данным [3], меньше 80 А) и большом объеме порошка в секторе пропускания тока энергии электрического тока может быть недостаточно для возбуждения дугового разряда. В результате возможно прерывание импульсного характера протека-

ния процесса, т. к. выделяемой теплоты недостаточно для расплавления порошка и оплавления поверхности детали. В данном случае нарушается стабильность технологического процесса, имеет место переходный режим обработки, характеризующийся нестабильностью параметров. А это, следовательно, обуславливает неопределенность результатов процесса магнитно-электрической обработки.

Изменение режимов процесса МЭО можно представить в виде графической интерпретации в координатах «сила тока I – изменение толщины поверхностного слоя h_n (h_w)» (рис. 3). Здесь h_n и h_w – толщина наносимого покрытия и величина съема материала соответственно.

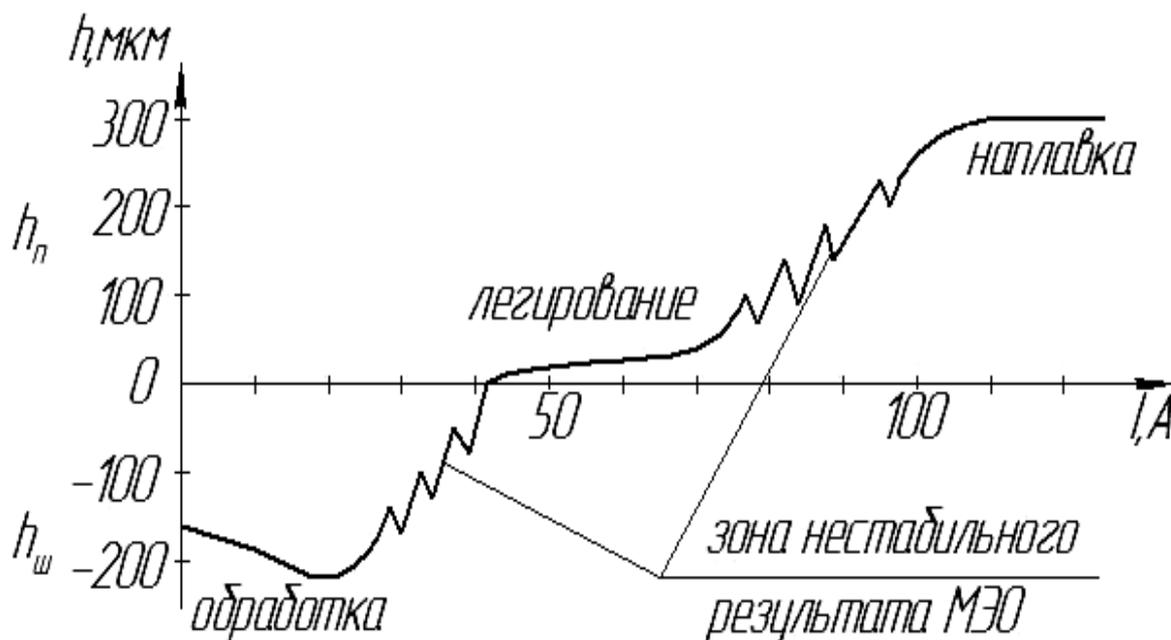


Рис. 3. Режимы процессов магнитно-электрической обработки

Таким образом, данный модуль позволяет реализовать технологию магнитно-электрической обработки в различных режимах процесса, т. е. в одном устройстве (на одном рабочем месте) представляется возможным осуществлять различные способы МЭО – в диа-

пазоне от МАО к МЭУ с переходным процессом легирования. Поскольку в зоне с пропусканием тока реализуется преимущественно упрочняющий режим, а в зоне без пропускания тока осуществляется чистовая обработка, то в зависимости от направления движения подачи

возможны два варианта реализации процесса совмещенной обработки.

Первый вариант. Движение подачи направлено таким образом, что обрабатываемая поверхность проходит вначале зону обработки с пропуском тока (см. рис. 2, зона *Б*), а затем зону без пропуска тока (зона *А*). Тогда в зоне *Б* осуществляется процесс МЭУ, т. е. происходит наплавка поверхностного слоя, а в зоне *А* – зачистка вновь образованной поверхности. В результате обеспечивается менее развитый рельеф поверхности, т. к. максимальный эффект выравнивания достигается при сглаживании неровностей в размягченном состоянии [3, 6].

Второй вариант. Обрабатываемая поверхность последовательно проходит зону без пропуска тока (см. рис. 2, зона *А*), а потом зону с пропуском тока (зона *Б*). В этом случае вначале происходит чистовая обработка поверхности, а затем упрочнение. При этом процесс наращивания поверхностного слоя идет по очищенной от окислов и загрязнений поверхности, т. е. по чистому металлу. Это способствует ускорению процесса диффузии и улучшению адгезии материала порошка с основным металлом, а следовательно, снижается уровень энергозатрат и повышается качество сформированного

поверхностного слоя.

Таким образом, применением данного модуля достигается совмещенность способов магнитно-электрической обработки не только в пространстве, но и во времени. Изменяя факторы и параметры процесса МЭУ на основе принципа технологической инверсии, можно управлять процессом обработки, изменяя его от «убыточного» режима (съем материала) до легирования и наращивания поверхностного слоя. В результате оптимального совмещения процессов обеспечиваются заданные геометрические и физико-механические характеристики поверхности обрабатываемой детали.

Заключение

Представленное конструктивное исполнение технологического модуля позволяет осуществлять функциональное объединение в одном устройстве (совмещенность в пространстве) магнитно-абразивной обработки и магнитно-электрического упрочнения. При этом реализация обоих процессов генерации поверхностного слоя может проходить одновременно (совмещенность во времени) с использованием синергетического эффекта, т. е. эффекта совместного действия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокие технологии размерной обработки в машиностроении / А. Д. Никифоров [и др.]. – Москва: Высшая школа, 2007. – 327 с.
2. Кульгейко, М. П. Роль инверсионности способов магнитно-электрической обработки при создании технологических комплексов генерации поверхностей / М. П. Кульгейко, Г. В. Петришин, Н. М. Симанович // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 4 (69). – С. 21–30.
3. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск: Технопринт, 2000. – 268 с.
4. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 176 с.
5. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. – Минск: Наука і тэхніка, 1991. – 215 с.
6. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1988. – 270 с.
7. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н. С. Хомич. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.

8. **Хомич, Н. С.** Работоспособность ферромагнитных абразивов в условиях автоматизированной обработки длинномерных изделий / Н. С. Хомич, М. П. Кульгейко, А. П. Лепший // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1991. – Вып. 19. – С. 49–53.
9. Исследование износостойкости покрытий из ферромагнитных порошков в условиях трения скольжения со смазкой / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник БГТУ. – 2004. – № 4 (28). – С. 39–42.
10. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск: Беларуская навука, 2017. – 376 с.
11. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца и С. А. Клименко. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 463 с.
12. **Шемегон, В. И.** Электроискровое упрочнение пробивных штампов / В. И. Шемегон // СТИН. – 1995. – № 5. – С. 27–29.
13. **Химухин, С. Н.** Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии: монография / С. Н. Химухин, Хосен Ри, Э. Х. Ри. – Хабаровск: Тихоокеанский гос. ун-т, 2015. – 127 с.
14. **Кочергин, К. А.** Контактная сварка / К. А. Кочергин. – Ленинград: Машиностроение, 1987. – 240 с.

Статья сдана в редакцию 23 декабря 2021 года

Михаил Петрович Кульгейко, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный университет транспорта. Тел.: 8-029-141-35-64. E-mail: kulgeyko82@rambler.ru.

Наталья Михайловна Симанович, ассистент, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-044-545-83-59. E-mail: nataliasimoniha1991@gmail.com.

Галина Степановна Кульгейко, ст. преподаватель, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-044-791-38-69. E-mail: kulgeyko@gstu.by.

Mikhail Petrovich Kulgeyko, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State University of Transport. Tel.: 8-029-141-35-64. E-mail: kulgeyko82@rambler.ru.

Natalia Mikhailovna Simanovich, assistant professor, P. O. Sukhoi State Technical University of Gmel. Tel.: 8-044-545-83-59. E-mail: nataliasimoniha1991@gmail.com.

Galina Stepanovna Kulgeyko, senior lecturer, P. O. Sukhoi State Technical University of Gmel. Tel.: 8-044-791-38-69. E-mail: kulgeyko@gstu.by.

DOI: 10.53078/20778481_2022_1_39

УДК 62-752.2:656.137

Д. А. Линник, О. В. Билык

КОНСТРУКЦИЯ ОПЫТНОГО ДЕМПФЕРА СИСТЕМЫ ПОДРЕССОРИВАНИЯ КАБИНЫ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

D. A. Linnik, O. V. Bilyk

THE DESIGN OF AN EXPERIMENTAL DAMPER FOR SUSPENSION SYSTEM OF A WHEELED TRACTOR DRIVER CAB

Аннотация

Приведен аналитический обзор литературы по вопросам влияния вибрации на организм человека (водителя колесного трактора). Рассмотрена конструкция опытного демпфера системы поддресоривания кабины колесного трактора. Представлены результаты лабораторных исследований конструктивных элементов опытного демпфера системы поддресоривания кабины.

Ключевые слова:

вибрация, водитель, кабина, колесный трактор, опытный демпфер, система поддресоривания.

Для цитирования:

Линник, Д. А. Конструкция опытного демпфера системы поддресоривания кабины колесного трактора / Д. А. Линник, О. В. Билык // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 39–48.

Abstract

An analytical review of the literature on the impact of vibration on human body (a wheeled tractor driver) is presented. The design of an experimental damper for the suspension system of a wheeled tractor driver cab is considered. The results of laboratory studies of structural elements of the experimental damper for the cab suspension system are presented.

Keywords:

vibration, driver cab, wheeled tractor, experimental damper, suspension system.

For citation:

Linnik, D. A. The design of an experimental damper for suspension system of a wheeled tractor driver cab / D. A. Linnik, O. V. Bilyk // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 39–48.

Введение

В настоящее время механизация сельского хозяйства охватывает большинство сельскохозяйственных операций как средство уменьшения интенсивного ручного труда, оптимизации своевременности выполнения задач и повышения производительности. Тем не менее, во многих случаях внедрение техники не устранило проблемы со здо-

ровьем рабочих.

Деятельность, выполняемая в сельском хозяйстве, разнообразна и имеет различный характер и требует использования специализированных машин для выполнения отдельных операций. Обычно сельскохозяйственная машина состоит из ведущей машины (трактора), соединенной с одной или несколькими работающими машинами. В зависимости от вида деятельности и,

следовательно, от используемой машины уровень вибрации водителя колесного трактора может значительно варьироваться.

Операторы сельскохозяйственных машин подвергаются воздействию общей вибрации всего тела с преобладанием низкочастотной вибрации. Если говорить о колесном тракторе, то основными внутренними источниками вибрации являются двигатель, трансмиссия, а иногда и гидравлические или пневматические системы, которые генерируют высокочастотные колебания. Основным внешним источником вибраций является контакт колес трактора с неровностями опорной поверхности в движении.

Фактически водитель колесного трактора может подвергаться очень разным уровням вибрации в зависимости от того, установлена ли на тракторе работающая машина, от типа работающей машины и от условий работы.

Человеческое тело представляет собой сложную механическую систему, состоящую из множества линейных и нелинейных элементов со значительными индивидуальными различиями. Частоты вертикальных колебаний некоторых частей тела человека можно принять с соответствующими приближениями, например: голова ≈ 25 Гц, плечи $\approx 4...5$ Гц, грудь ≈ 60 Гц, позвоночник $\approx 10...12$ Гц, живот $\approx 4...8$ Гц, бедра $\approx 50...200$ Гц, локти $\approx 16...30$ Гц, глазница $\approx 30...80$ Гц [1].

Резонанс возникает, когда частота вынужденных колебаний колесного трактора совпадает с собственной частотой ткани какого-либо органа водителя. В таких случаях даже колебания с относительно небольшой амплитудой могут привести к значительным дислокациям внутренних органов тела. Спектр частот колебаний колесного трактора разнообразен и колеблется от низких $1...50$ Гц (колебания кабины, рулевого колеса, осевые колебания колесного трактора, резонанс колес и т. д.)

до средних частот $100...1000$ Гц (колебания трансмиссии, выхлопная система, механические и газодинамические потоки во впускной и выпускной частях и т. д.) и высоких частот $1000...5000$ Гц (вибрации двигателя, механический шум и т. д.) [1].

Группа всех нарушений и изменений, возникающих под действием вибраций, составляет комплекс, известный как «вибрационная болезнь». Происхождение и развитие болезни до конца не изучены. Это сочетание негативного воздействия на нервы и их окончания, которое распространяется на всю нервную и вегетативную нервную систему. Отрицательные воздействия этой болезни влияют на сердечно-сосудистую, мышечно-апоневротическую и костную системы, зрение, сердце, желудок, обмен веществ. С одной стороны, многие расстройства, сопровождающие это заболевание, зависят от физических характеристик вибраций (частоты, амплитуды, скорости и ускорения), от направления распространения вибрации (вертикальное, горизонтальное, вращательное) на точки непосредственного контакта и передачи через ткань (локальное или общее), а с другой – зависят от индивидуальных особенностей организма.

Водители, постоянно подвергающиеся воздействию вибраций, жалуются на частую и стойкую головную боль, головокружение, утомляемость, раздражение и нарушения сна. Длительное воздействие вибраций приводит к дополнительным повреждениям центров равновесия и мозга. Поражение головного мозга сопровождается слабостью, хроническим истощением, постоянной сонливостью, похуданием, понижением артериального давления и, кроме того, могут наблюдаться некоторые другие симптомы: нарушения терморегуляции (реже более низкая, чаще повышенная температура), нарушения обмена веществ, нарушения в эндокринной системе и др. Некоторые исследования показывают прямую корреляцию между

вибрациями всего тела и болью в нижних частях позвоночника, а также в шее и плечах. Вибрации вызывают разрушение мышечной ткани и ее массы, а также изменения в сухожилиях с возможным разрывом сухожилий [2].

В современных колесных тракторах защита водителя от низкочастотной вибрации на сидение обеспечивается за счет использования в подвеске сидений гидравлических, пневматических и пневмогидравлических элементов, в частности сидения фирм «РИАТ» (Россия), «Fritzmeier» (Германия).

Многие производители колесных тракторов, воспользовавшись преимуществами сидений с подвеской в снижении вибрации при движении колесного трактора, рассматривали возможность включения подвески кабины как логичный и потенциально наиболее экономичный следующий шаг. Это направление уже перспективно развивается в различных европейских странах: итальянскими, французскими, австрийскими, немецкими производителями колесных тракторов, а также американскими производителями колесных тракторов. Они уже начинают подрессоривать кабину колесного трактора, используя гидравлические, пневматические и пневмогидравлические элементы (например, колесные трактора Diamond-260 (Италия), Rubin (Италия), Renault (Франция), Steyr (Австрия), Fendt (Германия), Challenger (США)).

Конструкция колесных тракторов, производимых в Республике Беларусь, не предусматривает подрессоривание кабины. Кабина установлена на остовах через виброизоляторы различной формы и размеров. В этом случае гашение низкочастотных вибраций будет осуществляться только за счет подвески сиденья водителя колесного трактора. Поэтому конструкция системы подрессоривания кабины колесного трактора требует своего совершенствования [3, 4].

Основная часть

Для повышения эффективности гашения низкочастотной вибрации, передаваемой на водителя колесного трактора, была разработана конструкция опытного демпфера кабины колесного трактора (рис. 1).

Основными конструктивными элементами опытного демпфера кабины являются цилиндрическая пружина 1 и гидравлический двухтрубный амортизатор с оригинальным поршневым узлом (см. рис. 1), состоящий из резервуара амортизатора в сборе 2, гайки пружины 3, проушины 4, резиновой втулки 5, втулки шарнира 6, клапана сжатия в сборе 7, цилиндра 8, буфера хода отбоя 9, деталей поршневого узла 10 (оригинальной конструкции), штока в сборе 11, гайки резервуара 12, сальника штока 13, поршня 14, направляющей втулки 15, верхней пружины поршня 16, нижней пружины поршня 17 [3].

Амортизатор был изготовлен в разборном варианте для регулировки силовых характеристик амортизатора в исследуемом диапазоне (см. рис. 1).

С помощью проушины 4 амортизатор крепится к кронштейну опытного демпфера кабины (см. рис. 1).

На корпусе резервуара 2 амортизатора установлена втулка с резьбой и гайкой пружины 3 для регулировки жесткости пружины опытного демпфера (см. рис. 1).

Конструкция поршневого узла амортизатора в сборе представлена на рис. 2.

Жесткость пружин поршня амортизатора подбиралась опытным путем в ходе проведения лабораторных испытаний на базе аккредитованной испытательной лаборатории производства автомобильных агрегатов ОАО «Белкард» [3]. Для проведения испытаний была использована машина для испытания пружин МИП-100-2 (рис. 3).



Рис. 1. Опытный демпфер системы поддресоривания кабины колесного трактора: 1 – цилиндрическая пружина; 2 – резервуар амортизатора в сборе; 3 – гайка пружины; 4 – проушина; 5 – резиновая втулка; 6 – втулка шарнира; 7 – клапан сжатия в сборе; 8 – цилиндр; 9 – буфер хода отбоя; 10 – детали поршневого узла; 11 – шток в сборе; 12 – гайка резервуара; 13 – сальник штока; 14 – поршень; 15 – направляющая втулка; 16 – верхняя пружина поршня; 17 – нижняя пружина поршня



Рис. 2. Конструкция поршневого узла амортизатора в сборе

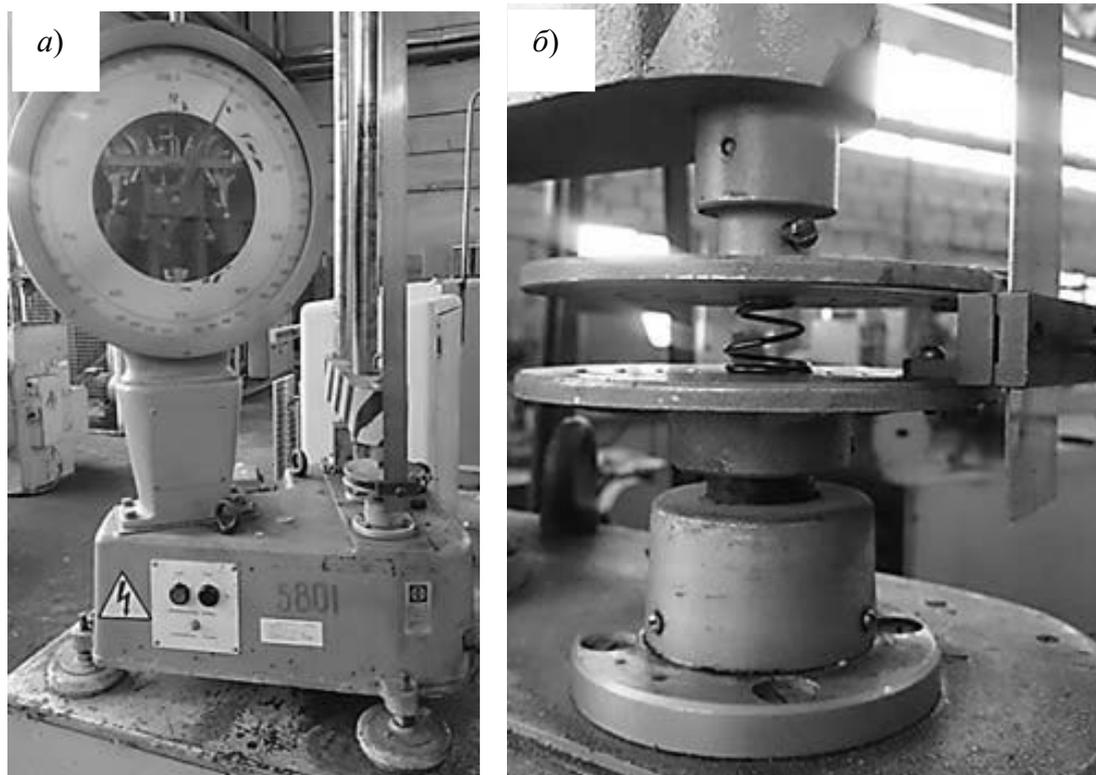


Рис. 3. Машина для испытания пружин МИП-100-2: а – общий вид машины; б – испытание пружины поршневого узла амортизатора

Температура воздуха в лаборатории во время проведения испытаний составляла плюс 20 °С.

Алгоритм проведения испытаний включал следующую последовательность действий:

- 1) установка пружины;
- 2) установка начальной координаты ($x = 0$);
- 3) испытание пружины;
- 4) регистрация данных;
- 5) окончание эксперимента;
- 6) обработка результатов.

На рис. 4 представлен график статической деформации пружин поршневого узла амортизатора из проволоки разного диаметра.

Для проведения испытаний амортизатора была использована испытательная установка с компьютерным управлением VDA-1001K фирмы «Wahl» (Германия) (рис. 5 и 6) на базе аккредитованной испытательной лаборатории производства автомобильных агрегатов ОАО «Бел-

кард» [3, 5]. Испытания амортизатора проводились в соответствии с ГОСТ 34339–2017 [6].

На VDA-1001K (см. рис. 5) проводилось снятие силовой характеристики амортизатора на ходах сжатия и отбоя [6].

Алгоритм проведения испытаний включал следующую последовательность действий:

- 1) установка амортизатора на испытательной установке (см. рис. 6);
- 2) ввод исходных данных (дата, ход поршня амортизатора (50 мм), скорости перемещения поршня: 0,03; 0,05; 0,08; 0,10; 0,13; 0,16; 0,18; 0,21; 0,24; 0,26; 0,29; 0,31; 0,34; 0,37; 0,39; 0,42; 0,45 и 0,49 м/с);
- 3) испытание амортизатора;
- 4) регистрация данных;
- 5) сохранение и вывод данных;
- 6) окончание эксперимента;
- 7) обработка результатов.

По результатам испытаний были сняты силовые характеристики амортиза-

тора на ходах сжатия и отбоя с пружинами поршня из проволоки $\varnothing = 1,8$ мм,

$\varnothing = 2,0$ мм и $\varnothing = 2,2$ мм (рис. 7).

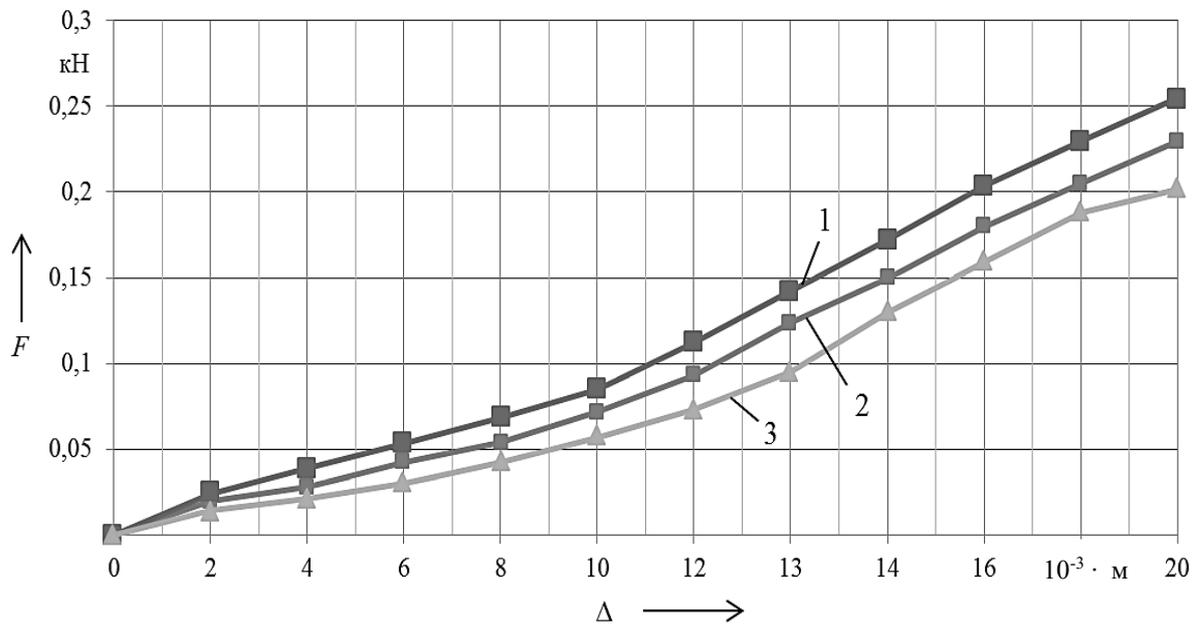


Рис. 4. График статической деформации пружины поршневого узла амортизатора из проволоки диаметром: 1 – 2,2 мм; 2 – 2,0 мм; 3 – 1,8 мм



Рис. 5. Общий вид испытательной установки с компьютерным управлением VDA-1001K фирмы «Wahl» (Германия)

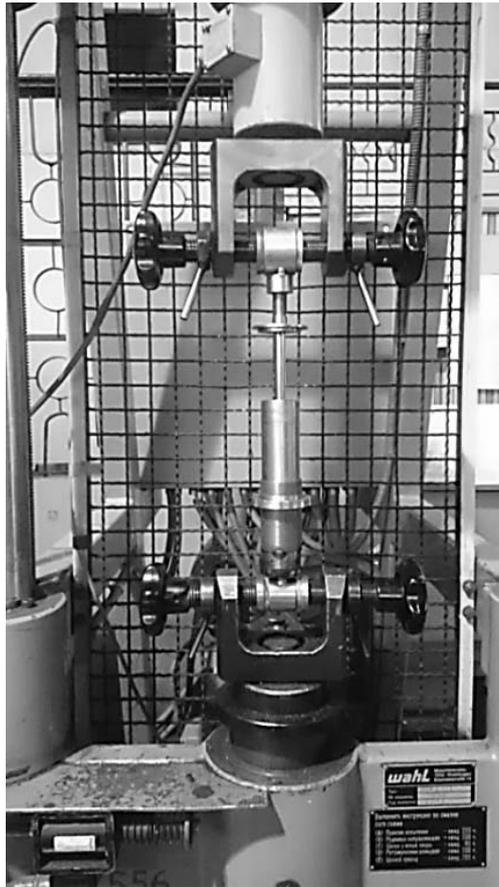


Рис. 6. Испытание амортизатора системы поддрессоривания кабины на VDA-1001K

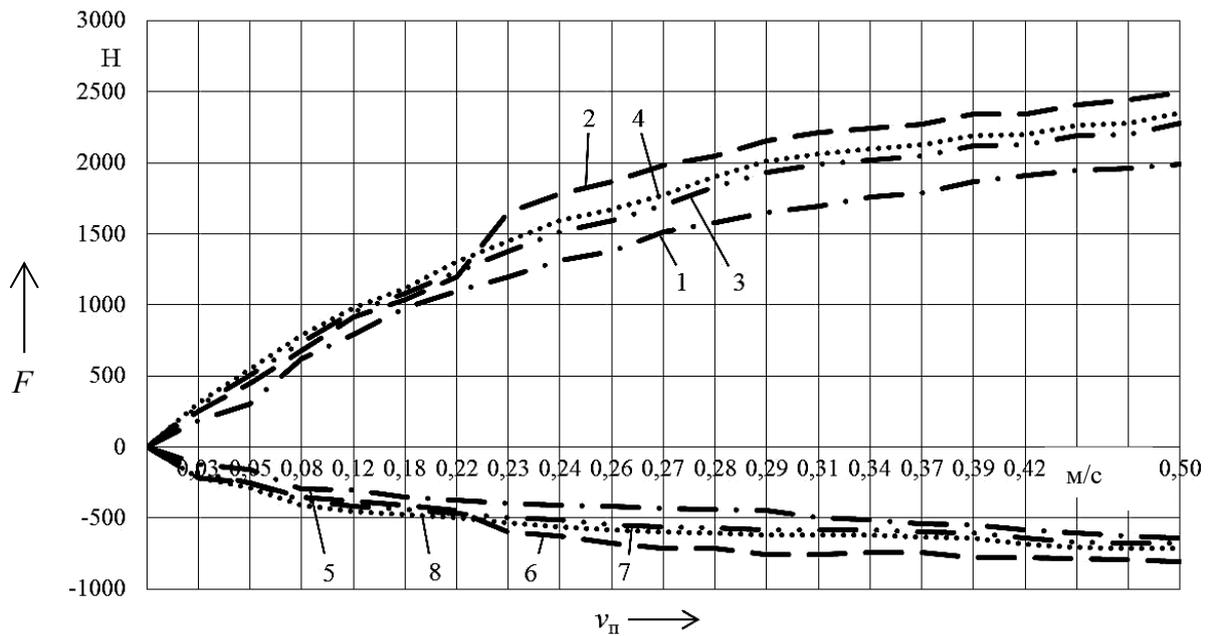


Рис. 7. Силовые характеристики амортизатора: 1 – ход отбоя с пружинной поршня из проволоки $\varnothing = 1,8$ мм; 2 – ход отбоя с пружинной поршня из проволоки $\varnothing = 2,0$ мм; 3 – ход отбоя с пружинной поршня из проволоки $\varnothing = 2,2$ мм; 4 – ход отбоя без пружин поршня; 5 – ход сжатия с пружинной поршня из проволоки $\varnothing = 1,8$ мм; 6 – ход сжатия с пружинной поршня из проволоки $\varnothing = 2,0$ мм; 7 – ход сжатия с пружинной поршня из проволоки $\varnothing = 2,2$ мм; 8 – ход сжатия без пружин поршня

По результатам стендовых испытаний можно сделать следующие выводы.

1. При установке в поршневой узел пружин из проволоки $\varnothing = 1,8$ мм на ходах сжатия и отбоя в диапазоне скоростей перемещения поршня от 0,03 до 0,50 м/с наблюдается снижение силы вязкого сопротивления амортизатора, что обусловлено недостаточной жесткостью пружин поршня и частичным дросселированием амортизаторной жидкости через дополнительные отверстия в поршневом узле (см. рис. 7).

2. При установке в поршневой узел пружин из проволоки $\varnothing = 2,0$ мм на ходах сжатия и отбоя в диапазоне скоростей перемещения поршня от 0,03 до 0,22 м/с наблюдается стабилизированная силовая характеристика за счет перемещения поршневого узла по поршневой шейке. При скорости больше 0,22 м/с (частоте больше 1,1 Гц) происходит резкое нарастание силы вязкого сопротивления амортизатора в диапазоне от 0,23 до 0,50 м/с за счет создания дополнительного сопротивления пружинами поршня в момент перекрытия ими дополнительных дросселирующих отверстий в опытном демпфере

(см. рис. 7), что позволяет повысить эффективность гашения низкочастотной вибрации.

3. При установке в поршневой узел пружин из проволоки $\varnothing = 2,2$ мм на ходах сжатия и отбоя в диапазоне скоростей перемещения поршня от 0,03 до 0,50 м/с наблюдается такая же силовая характеристика, как и у амортизатора без пружин поршня, что обусловлено высокой жесткостью пружин и дросселированием амортизаторной жидкости через дополнительные отверстия в поршневом узле (см. рис. 7).

На основании сделанных выводов было принято решение в конструкции поршневого узла амортизатора использовать пружины из проволоки $\varnothing = 2,0$ мм. Средняя жесткость пружины поршня из проволоки $\varnothing = 2,0$ мм составила $1,5 \cdot 10^3$ Н/м (см. рис. 4).

Жесткость цилиндрической пружины 1 (см. рис. 1) опытного демпфера кабины колесного трактора определялась в ходе проведения лабораторных испытаний на базе аккредитованной испытательной лаборатории производства автомобильных агрегатов ОАО «Белкард» (рис. 8).

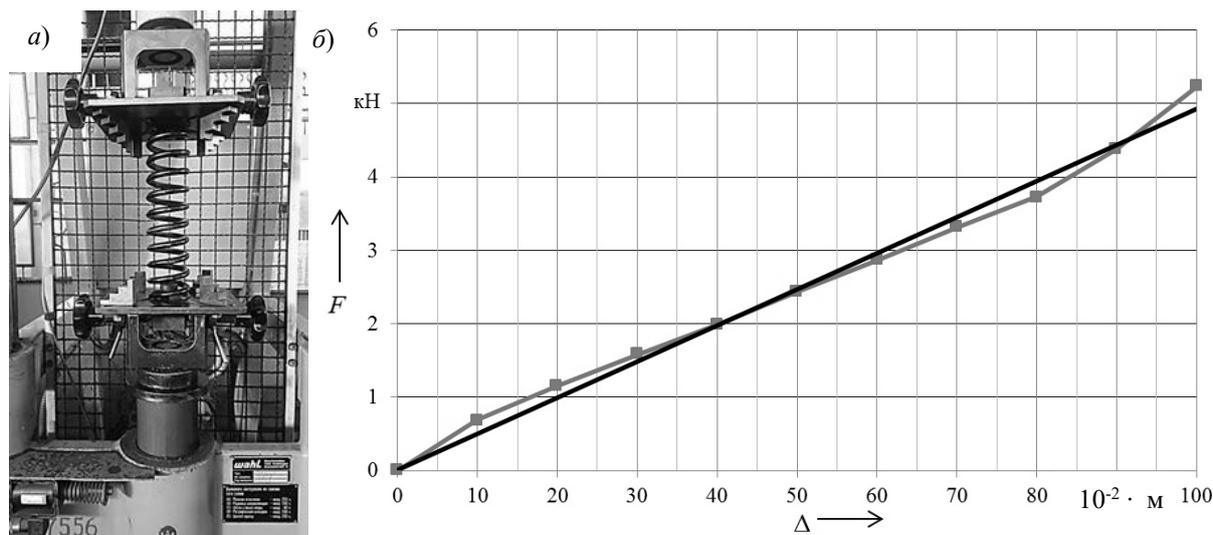


Рис. 8. Лабораторные испытания на VDA-1001K: а – испытание пружины опытного демпфера; б – график статической деформации пружины опытного демпфера

Температура воздуха в лаборатории во время проведения испытаний составляла плюс 20 °С.

Алгоритм проведения испытаний включал следующую последовательность действий:

- 1) установка пружины;
- 2) установка начальной координаты ($x = 0$);
- 3) испытание пружины;
- 4) регистрации данных;
- 5) сохранение данных;
- 6) окончание эксперимента;
- 7) обработка результатов.

На рис. 8 представлен график ста-

тической деформации пружины опытного демпфера.

Средняя жесткость пружины опытного демпфера составила $4,5 \cdot 10^5$ Н/м. График на рис. 8 отображает линейную характеристику цилиндрической пружины.

Испытания на долговечность амортизатора проводились на стенде для испытания амортизаторов на долговечность фирмы «Bilstein» (Германия) (рис. 9) на базе аккредитованной испытательной лаборатории производства автомобильных агрегатов ОАО «Белкард».

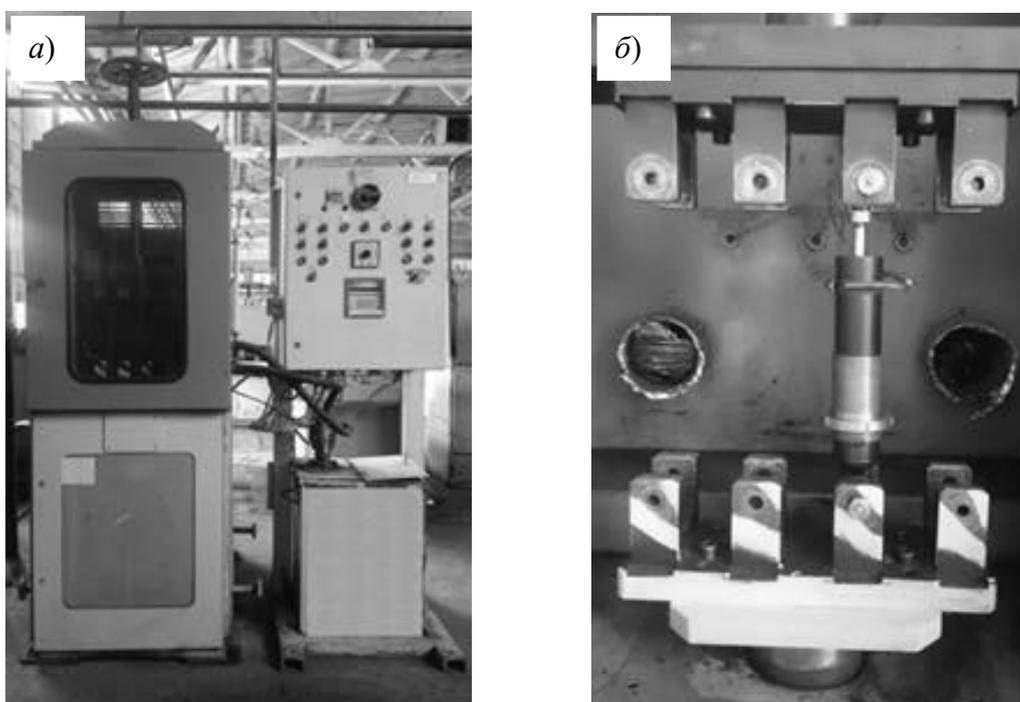


Рис. 9. Стенд для испытания амортизаторов на долговечность фирмы «Bilstein»: а – общий вид стенда; б – испытание амортизатора

Температура воздуха в лаборатории во время проведения испытаний составляла плюс 20 °С.

Алгоритм проведения испытаний включал следующую последовательность действий:

- 1) установка амортизатора на стенде;
- 2) установка хода поршня амортизатора (50 мм);

3) установка скорости перемещения поршня (0,31 м/с);

4) испытание амортизатора в объеме 1 000 000 циклов;

5) окончание эксперимента;

6) обработка результатов.

В процессе испытаний амортизатора осуществлялся контроль за его герметичностью и работоспособностью.

Заключение

Разработан и изготовлен опытный демпфер системы поддресоривания кабины колесного трактора, состоящий из цилиндрической пружины и гидравлического амортизатора с оригинальной конструкцией поршневого узла, обеспечивающей изменение силы вязкого сопротивления амортизатора.

На основании экспериментальных данных установлено, что при установке в поршневой узел амортизатора пружин

из проволоки $\varnothing = 2,0$ мм на ходах сжатия и отбоя обеспечивается изменение силы вязкого сопротивления амортизатора за счет создания сопротивления пружинами поршня в момент перекрытия ими дополнительных дросселирующих отверстий в поршневом узле амортизатора.

Испытания на долговечность позволили установить, что после 1 000 000 циклов работы на стенде амортизатор сохранил свою герметичность и работоспособность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Directive 2002/44/EC of the European parliament and the Council of 25 June 2002 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration) // Official Journal of the European Communities. – 2002. – L. 177, vol. 45. – 12 p.
2. **Cvetanovic, B.** Evaluation of whole-body vibration risk in agricultural tractor drivers / B. Cvetanovic, D. Zlatkovic // Bulg. J. Agric. Sci. – 2013. – Vol. 19 (5). – P. 1155–1160.
3. **Линник, Д. А.** Повышение эффективности системы виброзащиты рабочего места водителя колесного трактора / Д. А. Линник // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 2 (67). – С. 40–50.
4. **Линник, Д. А.** Математическая модель опытного демпфера подвески кабины колесного трактора / Д. А. Линник, В. М. Пецевич, А. Ч. Свистун // Вестн. БГСХА. – 2020. – № 2. – С. 139–143.
5. **Линник, Д. А.** Математическая модель и программа моделирования колебаний масс колесного трактора с поддресоренной кабиной / Д. А. Линник, В. И. Булгаков // Вестн. БГСХА. – 2020. – № 2. – С. 122–127.
6. Автомобильные транспортные средства. Амортизаторы гидравлические телескопические. Технические требования и методы испытаний: ГОСТ 34339–2017. – Введ. 01.04.2019. – Москва: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. – 19 с.

Статья сдана в редакцию 23 декабря 2021 года

Дмитрий Александрович Линник, канд. техн. наук, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы. Тел.: +375-152-62-18-78. E-mail: d.linnik@grsu.by.

Ольга Валерьевна Билык, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-73-74-26. E-mail: tea@bru.by.

Dzmitry Alexandrovich Linnik, PhD (Engineering), Yanka Kupala State University of Grodno. Tel.: +375-152-62-18-78. E-mail: d.linnik@grsu.by.

Volha Valeryevna Bilyk, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-222-73-74-26. E-mail: tea@bru.by.

DOI: 10.53078/20778481_2022_1_49

УДК 629.113.001

А. Н. Панов, Ж. А. Мрочек, В. М. Пашкевич

МЕТОДОЛОГИЯ И МОДЕЛИ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА, ЭКСПЛУАТАЦИИ, ОБСЛУЖИВАНИЯ И УТИЛИЗАЦИИ – НОВАЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

A. N. Panov, Z. A. Mrochek, V. M. Pashkevich

METHODOLOGY AND MODELS OF RISK-ORIENTED DESIGN, PRODUCTION, OPERATION, MAINTENANCE AND UTILIZATION AS A NEW FUNDAMENTAL SYSTEM FOR ENSURING COMPETITIVENESS OF MECHANICAL ENGINEERING

Аннотация

Разработаны методология и комплексные инновационные модели: риск-ориентированного проектирования и производства в машиностроении; оптимизации зависимостей «вероятность – ущерб» для продукции и процессов; идентификации значимости приоритета характеристик в конструкторско-технологической документации; определения приоритетных цепей причинно-следственных связей, индукции/дедукции источников отказов на основе менеджмента знаний; выбора статистических методов для верификации достижения соответствия на основе рисков; оптимальной связи значимости ущерба и вероятности событий с учетом изменения уровня знаний; оптимизации эффективности для организации в проектах и для конечного потребителя в жизненном цикле продукции на основе приоритизации характеристик и оптимизации вариаций.

Ключевые слова:

система, качество, надежность, безопасность, риски, процессы, машиностроение.

Для цитирования:

Панов, А. Н. Методология и модели риск-ориентированного проектирования, производства, эксплуатации, обслуживания и утилизации – новая фундаментальная система обеспечения конкурентоспособности машиностроения / А. Н. Панов, Ж. А. Мрочек, В. М. Пашкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 49–63.

Abstract

Methodology and complex innovative models have been developed, such as risk-oriented design and production in mechanical engineering; optimization of probability-damage dependencies for products and processes; identification of significance of the priority of characteristics in design and technological documentation; determination of priority chains of cause-and-effect relationships, induction/deduction of failure sources based on knowledge management; selection of statistical methods for verifying compliance based on risks; an optimal relationship between the significance of damage and the probability of events, taking into account changes in the level of knowledge; optimization of efficiency in projects for the organization and in the product lifecycle for the end user, based on prioritization of characteristics and optimization of variations.

Keywords:

system, quality, reliability, safety, risks, processes, mechanical engineering.

For citation:

Panov, A. N. Methodology and models of risk-oriented design, production, operation, maintenance and utilization as a new fundamental system for ensuring competitiveness of mechanical engineering / A. N. Panov, Z. A. Mrochek, V. M. Pashkevich // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 49–63.

Введение

Машиностроение – одна из основных отраслей промышленного комплекса гражданского и оборонного назначения высокоразвитых стран. Особое место в нем занимает создание мобильных машин (ММ), например, автомобилей, тракторов, сельскохозяйственной и карьерной техники. ММ являются, в том числе, составной частью военной и специальной техники (например, перевозящей опасные вещества), а также вооружения. ММ, с одной стороны, являются объектами технического регулирования (ОТР), т. е. на них распространяются, например, Федеральное законодательство России (ФЗ) и других стран ЕАЭС о техническом регулировании, нормировании, стандартизации и подтверждении соответствия, технические регламенты Таможенного союза (такие как ТР ТС 018), с другой – в соответствии с ФЗ и решениями Совета Безопасности Российской Федерации ММ могут выступать составной частью так называемых критически важных для национальной безопасности объектов (КВО). С учетом этого для ММ актуальны: обеспечение статической и циклической прочности, долговечности и надежности в нормальных и экстремальных условиях эксплуатации; живучесть и безопасность при возникновении существенных повреждений в случае экстремальных воздействий. Двойное назначение ММ позволяет снизить стоимость их производства, повысить качество и конкурентоспособность. Для ММ, которые одновременно являются объектами ОТР и КВО, могут стать характерными вероятности локальных, объектовых, местных, региональных и национальных катастроф от 10^1 до 10^{-2} ед./год с ущербом от 10^3 до 10^{10} р. Специальными свойствами для ММ является повышенная живучесть и защищенность от экстремальных поражений при сохранении повышенных скорости, проходимости и грузо-

подъемности.

Для ММ, как объектов ОТР, в соответствии, например, с законом о транспортной безопасности Российской Федерации, вероятности локальных и объектовых катастроф могут быть более 10 ед./год с ущербом $10^3 \dots 10^7$ р. Следует отметить, что если в настоящее время в отдельных странах Европы в ДТП ежегодно погибает порядка 0,01 %...0,02 %, травмируется свыше 0,04 % численности населения, то, по прогнозам ВОЗ, через 10 лет одной из основных причин гибели людей могут быть дорожно-транспортные происшествия на автомобильном гражданском транспорте.

Необходимо не только создавать новые типы ММ, но и как при изготовлении, так и при эксплуатации обеспечивать приемлемые риски отказов, вероятность несоответствия техническим требованиям, безопасности и защищенности от аварий и катастроф. Анализ показывает, что усложнение конструкции, технологии, производства и эксплуатации при использовании традиционных методов проектирования и изготовления будет приводить к увеличению количества отказов ММ и связанных с ними аварий и катастроф. Следует отметить, что человеко-машинные системы весьма сложные и традиционные методы оценки, например, надежности (схемной и т. п.), не являются адекватными для достижения требуемых вероятностей.

Актуальной задачей в научном и прикладном плане является разработка взаимоувязанных методологии, моделей, методов расчетов, испытаний, нормирования и обеспечения в первую очередь показателей прочности, надежности и безопасности ММ и процессов их проектирования и изготовления для обеспечения приемлемых конструкторско-технологических рисков. Сами риски определяются как связь вероятности возникновения несоответствий (отказов, аварийных и катастрофических ситуаций) и величины ущерба (экономиче-

ские последствия в связи с потерей жизни и здоровья людей, разрушением объектов ОТР, КВО, поражением окружающей среды и т. д.) на анализируемом отрезке жизненного цикла ММ.

Многокритериальное обоснование развития методологии и моделей управления рисками

Комплексный анализ теории и практики проектирования и изготовления технических и технологических систем (ТТС) для автомобильной промышленности, тракторостроения, сельскохозяйственного, погрузочно-транспортного, карьерного и специального машиностроения, принятых в странах СНГ, ЕАЭС и за рубежом, выявил системные проблемы и закономерности, не позволяющие традиционными методами и существующей инженерной практикой при создании ТТС обеспечить требуемое эффективное соотношение «цена – качество – сроки поставки» для достижения малых вероятностей (например, 40...100 ppm). Особыми проблемами являются: взаимосвязь процессов жизненного цикла ТТС; достижение установленных показателей нагруженности (прочность, ресурс, надежность, живучесть, эксплуатационная безопасность) и сопротивления повреждению; вариации и бифуркации процессов проектирования, испытаний, изготовления, контроля качества, обслуживания, эксплуатации в условиях ограниченных ресурсов у заинтересованных сторон. Причины – использование комплекса моделей, методов и средств, не адекватных концепции управления рисками и затратами, возникающими как при проектировании, так и при производстве и эксплуатации ТТС. Поэтому разработка и внедрение методологии системного исследования, планирования и обеспечения надежности и безопасности ММ из условий прочности и долговечности при оптимальных затратах на их производство и эксплуата-

цию является важнейшей научной и практической проблемой. Об актуальности темы, целей и задач для стран свидетельствует, например, ее соответствие: требованиям о внедрении риск-ориентированного подхода (Федеральные законы Российской Федерации № 172-ФЗ от 28.06.2014, № 390-ФЗ от 28.12.2010), о научно обоснованных представлениях о рисках (Указ Президента Российской Федерации № 400 от 02.07.2021), о приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники (Указ Президента Российской Федерации № 899 от 07.07.2011); Программе социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь № 292 от 29.07.2021), распоряжению Правительства Российской Федерации № 831-р «Об утверждении стратегии развития автомобильной промышленности до 2025 года» от 28.04.2018.

Документы направлены:

1) на устранение основных проблем:

– неконкурентоспособный уровень качества продукции и качества производства;

– низкая эффективность и производительность труда;

2) на создание и применение новых технологий проектирования, методик конструирования и подготовки производства для:

– сокращения сроков разработки;

– обеспечения и повышения конкурентоспособности по продукту и по себестоимости путем осуществления комплексных программ снижения себестоимости (включая design-to-cost);

3) на гармонизацию:

– требований технических регламентов, стандартов и правил с международной практикой;

– отраслевых стандартов требованиям международных стандартов, применяемых за пределами Евразийского экономического союза.

В настоящее время в мире в стандартах для машиностроительной отрасли устанавливаются требования и рекомендации, основанные на использовании фундаментально новой концепции – риск-ориентированного подхода, отраженного, например, в стратегии национальной безопасности Российской Федерации [1], в законодательстве о промышленной безопасности Российской Федерации [2, 3], а также ряде национальных и международных стандартов (ISO 31000 и др.). К наиболее значимым стандартам следует отнести определяющие взаимодействие и риски персонала при создании продукции. Это стандарты для менеджмента организаций в областях: качество (ISO 9001), надежность (IEC 60300), безопасность (ISO 45001), экология (ISO 14001), знания (ISO 30401) и т. д. Цель – эффективное создание конкурентоспособной продукции с ускоренными сроками подготовки и ведения производства машиностроительного комплекса [1–5].

Традиционная, сложившаяся как в мире, так и в СССР и СНГ, система разработки техники основана на единой системе проектирования продукции и процессов изготовления, обслуживания и ремонта, например, для предупреждения отказов и разрушений по характеристикам прочности

$$\sigma_{\max}^3 = F_{\sigma} \{Q(F, w)\} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_o}{n_{\sigma}}, \quad (1)$$

где σ_{\max}^3 – максимальные номинальные или местные напряжения; Q – расчетные нагрузки (механические, аэродинамические, электромагнитные, тепловые); F, w – размеры опасных сечений и моменты сопротивления; $[\sigma]$ – допускаемые напряжения; σ_o – опасные напряжения; n_{σ} – запасы прочности.

Система включает правила разработки и оформления документации, в том числе назначения номинальных размеров, полей допусков, влияющих на Q, F и w . Действующие технологиче-

ские нормы проектирования и производства являются основой для назначения соответствующих объемов выборки из партии продукции при проведении, например, ее статистического контроля. Следует отметить, что термин «дефект» по ГОСТ 15467 констатирует уже установленный факт несоответствия продукции установленным требованиям, критичность также рассматривается как совершенное событие.

Введение в (1) временных по τ и вероятностных по p характеристик позволяет получить параметры новой платформы риск-ориентированного подхода с определением ресурса по времени τ и числу циклов N

$$\{\tau, N\} = F_{\tau, N} \{\sigma_{\max}(\tau, N), \sigma_{on}(\tau, N)\} \quad (2)$$

и надежности по характеристикам вероятности разрушения

$$p(\tau, N) = F_p \{Q(\tau, N, p), \sigma_{on}(\tau, N, p)\}. \quad (3)$$

В целом платформа риск-ориентированного подхода (позволяющая достигать цели при общем планетарном сокращении ресурсов с фокусированием на приоритетах) в настоящее время в мире системно недостаточно подкреплена методологией связи последствий рисков с первопричинами – характеристиками продукции и процессов изготовления и эксплуатации [1–5]. Основными причинами этого являются: недостаточно развитый терминологический аппарат качества, надежности и т. п. (см. ГОСТ 16504, ГОСТ 15467, ГОСТ 22732, ISO 9000, ГОСТ 27.002–89, ГОСТ 27.002–2016 и др.), в частности, в связи с определением термина «риск» (воздействие неопределенности, см. ISO 9000); несбалансированность систем [1, 2] и целей, а также недостаточная разработанность методологий и моделей на базе риск-ориентированного подхода.

Научная гипотеза

Выдвинута гипотеза о том, что достижение максимума эффективности при приемлемом риске несоответствий при создании и применении ТТС возможно в рамках жизненного цикла ТТС на основе оптимизации нормирования и затрат на качество, надежность и безопасность путем: опережающего планирования вероятности несоответствия ТТС, процесса ее изготовления, эксплуатации, обслуживания и утилизации в зависимости от значимости последствий как критериев приемлемости риска; реализации планов для достижения вероятностей как возникновения всех причин несоответствий, так и их обнаружения при контроле до приемлемой величины, определяемых достигнутым уровнем развития науки и техники [1, 2].

Традиционно в машиностроении используются классификации, которые разделяют по значимости компоненты технической системы / изделия, например, «отказ приводит к аварии», «отказ приводит к повышенным расходам». Наиболее часто причиной отказов в эксплуатации для серийно выпускаемых изделий является необеспечение качества при производстве, что может быть оценено расчетом надежности технологического процесса по параметрам качества продукции (например, по ГОСТ 27.202) и расчетом вариации процесса тиражирования. В связи с тем, что на практике процессы проектирования, изготовления, эксплуатации, восстановления и утилизации реализуются в течение времени t , происходят значительные изменения, вариации и возникают бифуркации – на первый план выходит не столько анализ и оценка дефектности, а предупреждение и управление рисками, которые следует начинать с концептуального проектирования и продолжать на протяжении всего жизненного цикла продукции. Следует отметить, что в настоящее время накоплены базы данных и базы знаний глу-

бинных причинно-следственных связей для III–IV укладов техники, за исключением V, VI технологических укладов. Они позволяют не только идентифицировать первопричины отказов/рисков еще на стадии зарождения и формирования, но и управлять вероятностью p возникновения первопричин несоответствий как для типа продукции, так и для типа процесса тиражирования, восстановления, утилизации [1–5]. Наличие базы знаний дает возможность определить, в том числе приоритетные для последствий с позиции величины потенциального ущерба, первопричины отказов (рис. 1). На рис. 1 представлены взаимосвязанные сценарии методом индукции для идентификации на основе причинно-следственных связей следствий и взаимосвязанных рисков (ущербов с учетом значимости приоритета, а также вероятности возникновения/обнаружения). Рассматриваются цепи взаимосвязанных событий – следствий до последнего значимого для заинтересованных сторон уровня – последствия для конфигуратора (система высшего уровня для данного сценария). Достигнутый уровень знаний определяет возможные варианты следствий и последствий. При проведении анализа сценариев необходимо фокусироваться на наибольших ущербах. Указанное определяет необходимость в идентификации значимости приоритетов. Требования к вероятности возникновения/обнаружения несоответствия последствия определяет соответствующую иерархию цепей сценариев участвующих соответствующих подсистем, элементов и первопричин.

На рис. 1 представлен анализ отказа системы (продукция/процесс) как иерархии методом дедукции для идентификации причинно-следственных связей рисков. Рассматриваются система, подсистемы, элементы, первопричины несоответствий и взаимосвязанных ущербов с учетом значимости, а также вероятности их возникновения и обна-

ружения. Достигнутый уровень знаний определяет глубину поиска первопричины в ходе анализа рисков. При проведении анализа следует фокусироваться на наибольших ущербах. Все это определяет необходимость в идентификации

значимости приоритетов. Требования к вероятности возникновения/обнаружения несоответствия продукции/процессов определяют соответствующую иерархию для подсистем, элементов и первопричин.

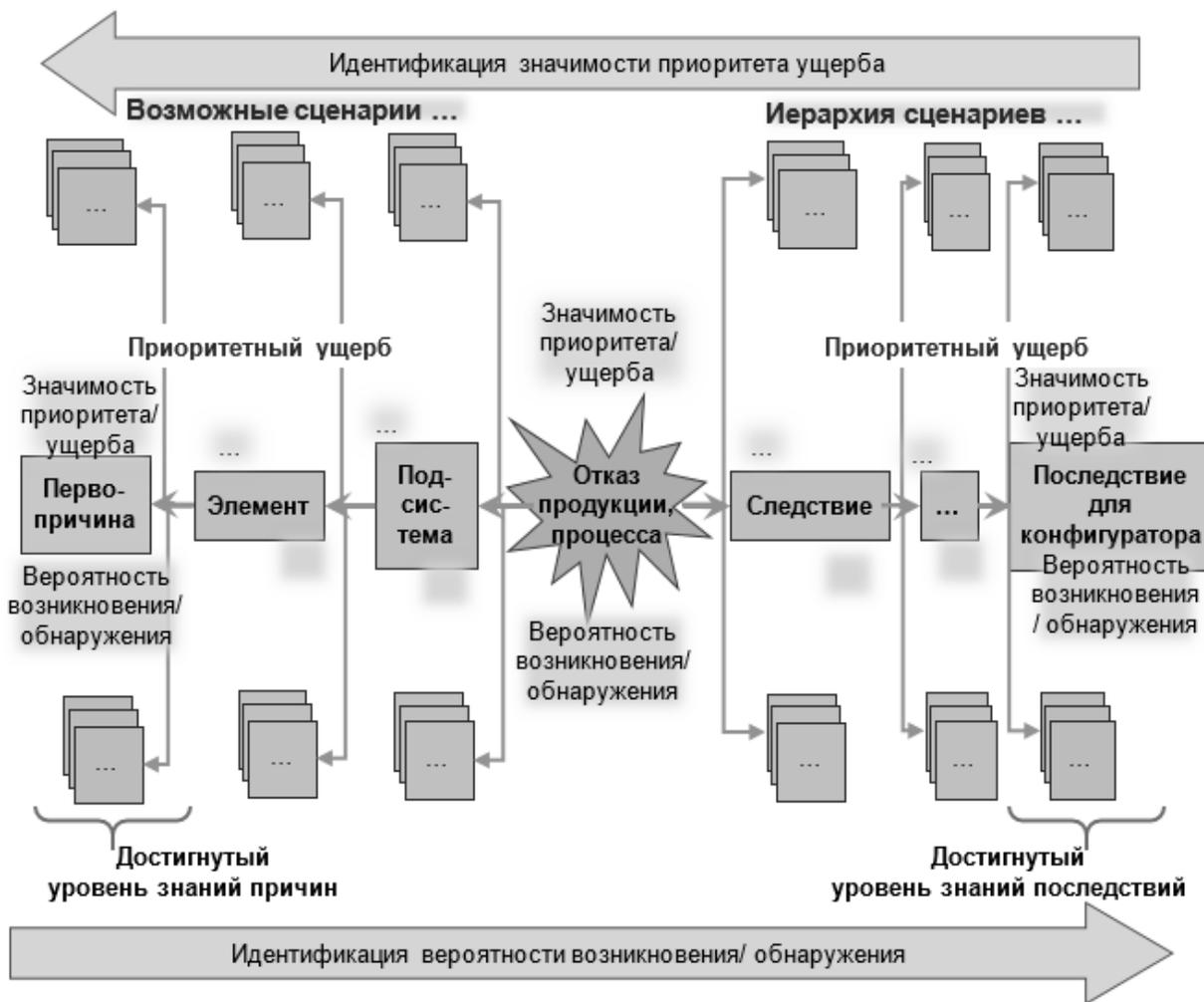


Рис. 1. Идентификация цепей причинно-следственных связей источников отказов «подсистема – элемент – первопричина» и их результатов «следствие – ... – последствие для конфигуратора» на основе менеджмента знаний. Сдвоенное дерево индукции/дедукции

Следует отметить, что ущербы отказа ММ сами по себе (простой единицы техники, травмирование или даже гибель человека) значимы, но при этом, как правило, не являются существенными для организации и ее экономической безопасности.

Отказы ММ в значительно большей степени определяют последствия для будущего проекта, в рамках которого осуществляется создание, эксплуатация, обслуживание, утилизация ММ, и даже могут быть критичны для существования организации в целом (рис. 2).

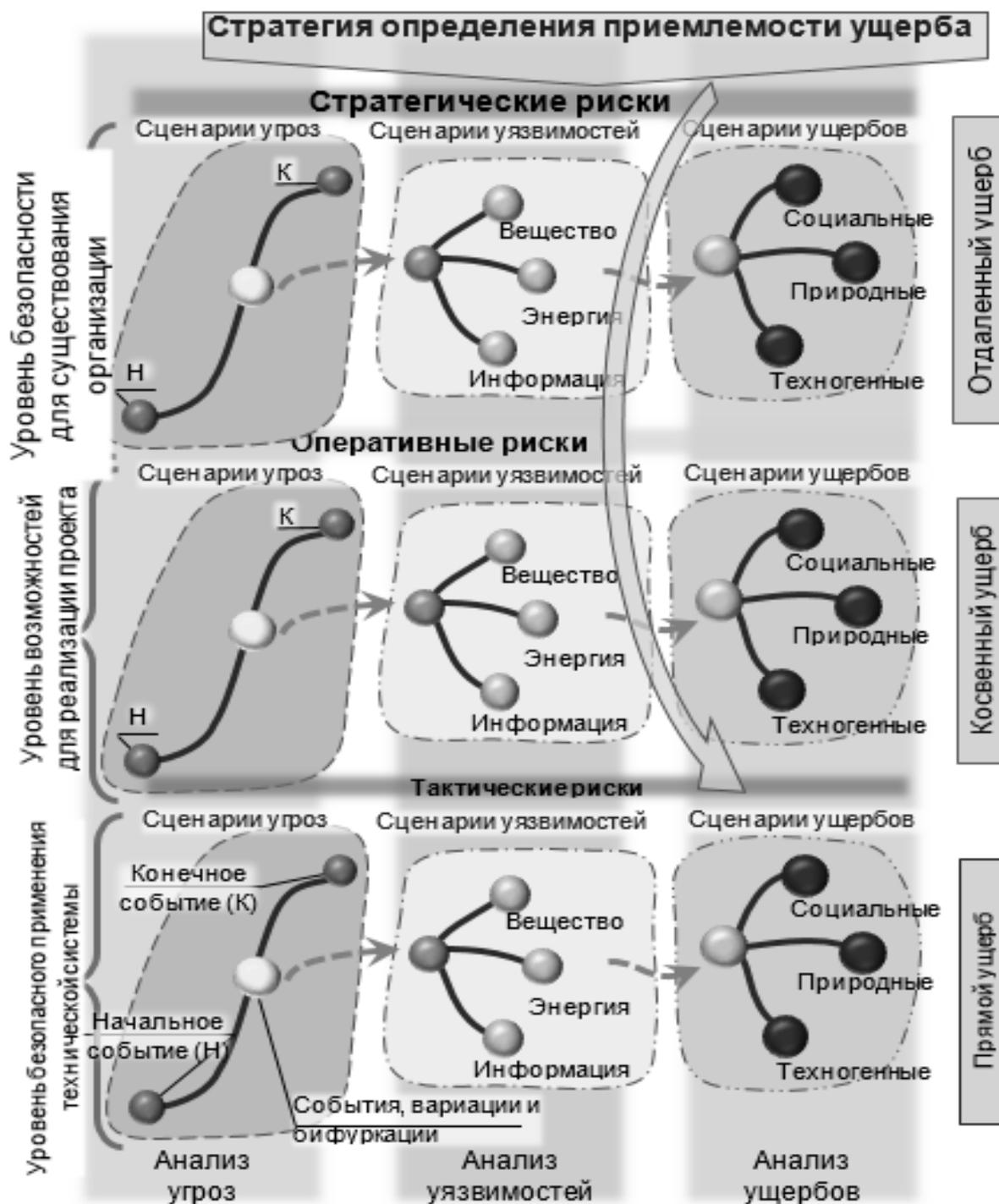


Рис. 2. Модель анализа прямых, косвенных и отдаленных рисков на основе риск-ориентированного проектно-процессного подхода

Модель анализа прямых, косвенных и отдаленных рисков представлена на рис. 2. Определены иерархии тактических, оперативных и стратегических рисков: анализа угроз в жизненных циклах продукции, проектов и органи-

зации от начального до конечного события; анализа уязвимостей – вероятность несоответствующих информации, энергии, вещества в жизненных циклах продукции, проектов и организации; анализа ущерба: техногенные,

природные и социальные в жизненных циклах продукции – прямой ущерб, проектов – косвенный ущерб и организации – отдаленный ущерб. Исходя из стратегических рисков определяется приемлемость оперативных рисков проекта и тактических рисков продукции – ММ. Последовательность расчетов ущербов определяется следующим порядком построения сценариев ущербов: тактический, оперативный и стратегический уровни. Предложены и уточнены [1–5] ряд терминов, определений и классификаций, например, приоритетность характеристик рисков: событий, вариаций, бифуркаций; ранжирования рисков: пренебрежимые, приемлемые и чрезмерные.

Совместное рассмотрение функций «качество – цена» для поставщика и потребителя позволило определить зоны оптимальности [1–5] для заинтересованных сторон при использовании риск-ориентированного подхода. Совершенствование научной базы для нормативного обоснования безопасности мобильной высокоответственной и высокорисковой техники двойного назначения, например, для колесных машин, для подвижного состава железнодорожного транспорта, а также категорирование отказов, аварий и катастроф в зависимости от последствий – потенциального ущерба – широко представлено в многотомном издании «Безопасность России» [1].

Следует отметить, что практика [4–6] управления рисками ММ серийного и массового производства без разработанной и внедренной методологической поддержки приводит к недостаточной результативности, даже при наличии фундаментальных наработок. Анализ свидетельствует, что необходимо продолжить развитие методологии и методов результативного и эффективно управления рисками на основе системной взаимосвязи категорирования последствий отказов и научно-технической базы знаний их идентифициро-

ванных первопричин.

В истории развития теории и практики машиностроения [1, 2] можно выделить базовые положения, которые используются для достижения соответствия требованиям к продукции машиностроения, среди которых наиболее значимые:

1) изменение научных основ проектирования [1–5]: детерминированное – когда определено требование по установлению в технической документации номинальной величины характеристики; вероятностное – когда для номинального значения характеристики появилось поле допуска – система качеств, а затем оценивается статистика попадания в это поле фактической величины при производстве;

2) анализ причины отказов техники и технологий осуществляется путем декомпозиции расчетов и испытаний машин и процессов их изготовления [1–5]: машина в целом, узел, деталь и далее зоны (например, концентрации) зарождения повреждений;

3) использование при анализе этапов жизненного цикла продукции соответствующих подходов: детерминированный – нагруженность в эксплуатации и процессы изготовления неизменны; вероятностный – все процессы нестабильны и им присущи вариации;

4) критерии достижения соответствия качества продукции, начиная с использования «запасов прочности», развивались далее – к планируемым и достигаемым параметрам ресурса и надежности/вероятности отказа, например, по ГОСТ 15467 и [1–5];

5) критерии безопасности и защищенности по параметрам рисков [1, 2].

Следует отметить, что решение о совершенствовании системы нормирования технических требований без методологической поддержки приводит к недостаточной результативности управления рисками в практике, хотя при этом имеются фундаментальные наработки по управлению рисками [1–5],

в том числе в машиностроении. Известен [1–3] статистический подход для достижения соответствия выхода процесса / цели потребителя, который основан на снижении вариаций процесса, измерительной системы или робастности процесса [4]. Для повышения результативности, эффективности и конкурентоспособности организаций в экономике создается научное обоснование методологии и моделей риск-ориентированного проектно-процессного подхода для нормирования рисков технических характеристик [1–4].

Разработаны [1–5] модели риск-ориентированного подхода для достижения приемлемой степени соответствия выходов процессов проектирования и изготовления целям потребителя и поставщика на основе оптимизации вариаций процессов и измерительной системы, а также достижения робастности процессов: риск-ориентированного подхода для достижения приемлемой степени соответствия выхода процесса / цели потребителя и поставщика на основе оптимизации вариаций процесса, измерительной системы, а также робастности процесса [2–5]; оптимизации эффективности для потребителя и поставщика на основе риск-ориентированного подхода для достижения приемлемой степени соответствия выхода процесса / цели потребителя и поставщика на основе оптимизации вариации процесса [2–5]. Совместное рассмотрение функций качества поставщика и потребителя [1–5] определяет зоны оптимальности. Указанные зоны являются результатом компромисса «качество – цена» при использовании риск-ориентированного подхода.

Для результативного применения риск-ориентированного подхода, в том числе риск-ориентированного проектирования, в машиностроении предложено [1–5] системно развить все четыре упомянутых базовых положения. Во-первых, введение в конструкторско-

технологической документации (наряду с полем допуска) идентификаторов значимости (приоритетности) характеристик для заинтересованных сторон. Во-вторых, проведение анализа корневой причины отказов (с учетом приоритетности) до уровня декомпозиции первопричины, определяемой актуальным на момент проектирования знанием науки, техники и технологий (см. рис. 1). В-третьих, введение риск-ориентированного подхода и осуществление анализа процессов жизненного цикла машины/продукции по сценариям угроз (события, вариации, бифуркации) для идентификации уязвимости техники, технологии и возможных ущербов (см. рис. 2). В-четвертых, установление критериев качества, надежности, безопасности: не просто обеспечение соответствия показателя типа продукции техническому заданию, а «ущерб – вероятность» недостижения соответствия типа продукции требованиям заинтересованных сторон; не вероятность попадания характеристики в поле допуска, например, при тиражировании/восстановлении/утилизации, а «достижение приемлемого риска» («ущерб – вероятность»).

Уровень неуязвимости технических систем (номинальных значений и оптимальной вариации характеристик) должен достигать уровня приемлемых рисков несоответствия требованиям заинтересованных сторон. Этого можно достичь путем управления рисками с фокусированием на коренных первопричинах (рис. 3).

Для этого в развитии существующей системы конструкторско-технологической документации предлагается ввести дополнительные группы документов: «планы управления рисками продукции и процессов» (начиная с этапа концепции и заканчивая утилизацией), а также «анализ достижения приемлемых рисков продукции и процессов» [1–4].

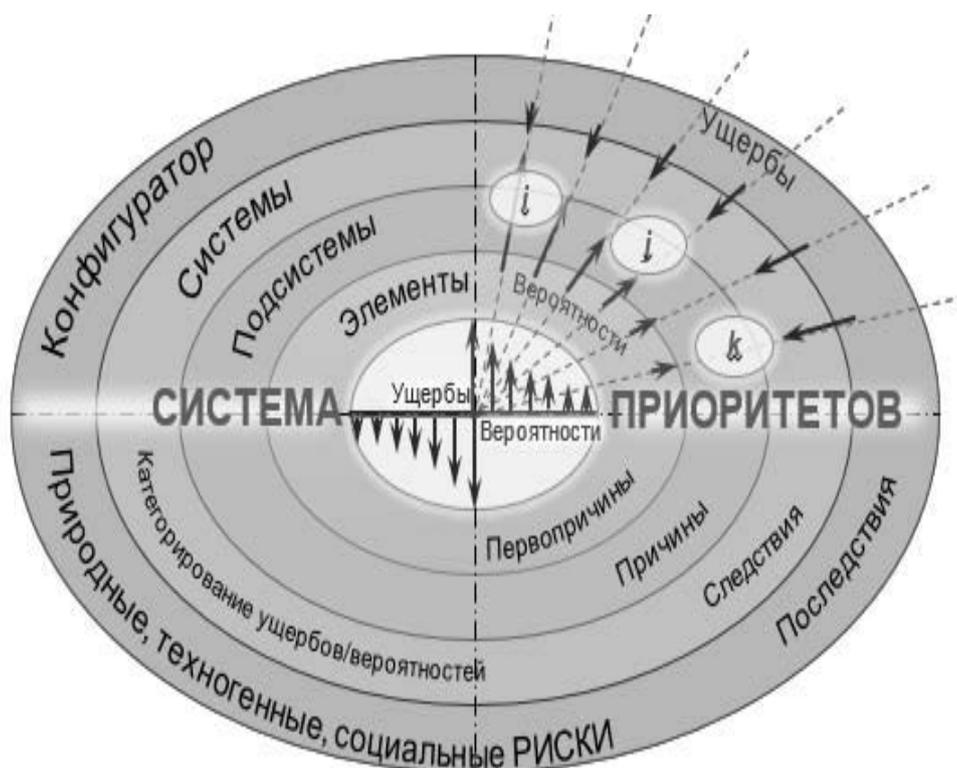


Рис. 3. Система приоритизации рисков

На основе развития приведенных парадигм обеспечения соответствия машиностроительной продукции при использовании риск-ориентированного подхода предложены [1–5]:

1) **фундаментальная пятикомпонентная модель оптимизации** зависимостей «вероятность – ущерб» – «качество – цена» – «вариация – ущерб», а также шкала «значимость приоритета – вероятность» для продукции (процесса) (рис. 4). При этом модель менеджмента рисков оптимизации зависимостей «вероятность – ущерб» развивалась начиная от двухступенчатой (соответствующая/несоответствующая продукция), через трехступенчатую (критические, значительные, незначительные дефекты), к многоступенчатой классификации;

2) **модель оптимизации выбора типа измерительной системы и ее вариации** в зависимости от ущерба. Указанное позволяет на основе идентифицированной значимости приоритета

адекватно управлять рисками измерительных систем [1–4];

3) **модель идентификации «значимости приоритета характеристики»** в конструкторско-технологической документации в дополнении к традиционным параметрам – номинальной величине и полю допуска (рис. 5). Указанное является принципиально новым при разработке конструкторско-технологической и эксплуатационной документации, что позволяет эффективным образом управлять первопричинами возникновения последствий в зависимости от приоритетов [1–4];

4) **модель идентификации приоритетных цепей причинно-следственных связей** источников отказов «подсистема – элемент – первопричина» и их результатов «следствие – промежуточные события – следствие для конфигулятора» на основе менеджмента знаний. Применение модели позволяет снизить требуемые ресурсы на разработку техники и технологий без

потери качества продукции, а также существенно сократить время выхода на рынок;

5) **матрица выбора** необходимых статистических методов, методов оценки вариации метрологических систем, видов аудитов продукции и процессов изготовления в зависимости от приоритетности характеристики для верификации приемлемости вариации для достижения целей (качества, надежности, безопасности) при тиражировании продукции [1–4];

6) **модель оптимальной связи значимости ущерба и вероятности событий с учетом изменения уровня знаний.** Указанное направлено на обеспечение адекватной оценки вариантов повышения качества, надежности и безопасности продукции, а также рисков в зависимости от используемого при проектировании технологического уклада [1–4];

7) **модель оптимизации затрат на достижение требуемых знаний.** Позволяет обосновывать и оптимизировать в рамках реализации проектов по созданию инновационной техники затраты на проведение НИР и ОК(Т)Р [1–4];

8) **модель оптимизации эффективности для организации в проектах и для конечного потребителя в жизненном цикле продукции** (рис. 6). Использование системы идентификации приоритетов в конструкторско-технологической документации и оптимизации вариации при изготовлении и восстановлении (см. рис. 1–5) позволяет снизить себестоимость продукции и эксплуатационные затраты при аналогичных технических характеристиках продукции, в том числе надежности и безопасности, что дает возможность повысить объем производства в конкурентной экономике.

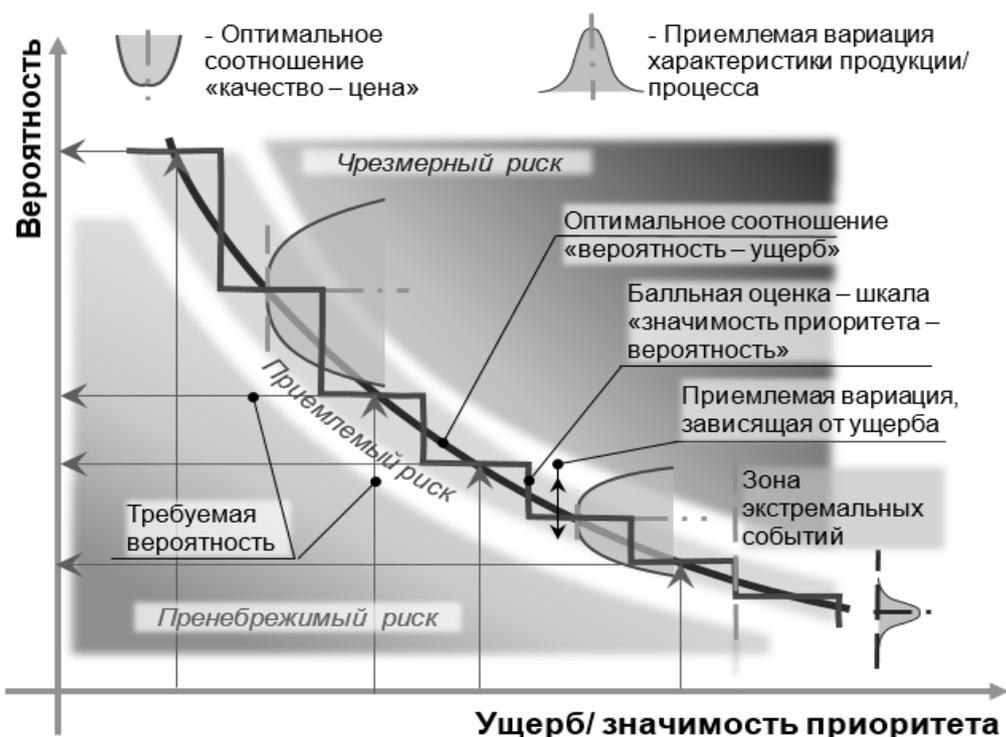


Рис. 4. Пятикомпонентная модель оптимизации зависимостей «вероятность – ущерб» – «качество – цена» – «вариация – ущерб» при риск-ориентированном подходе. Шкала «значимость приоритета – вероятность» для продукции/процесса

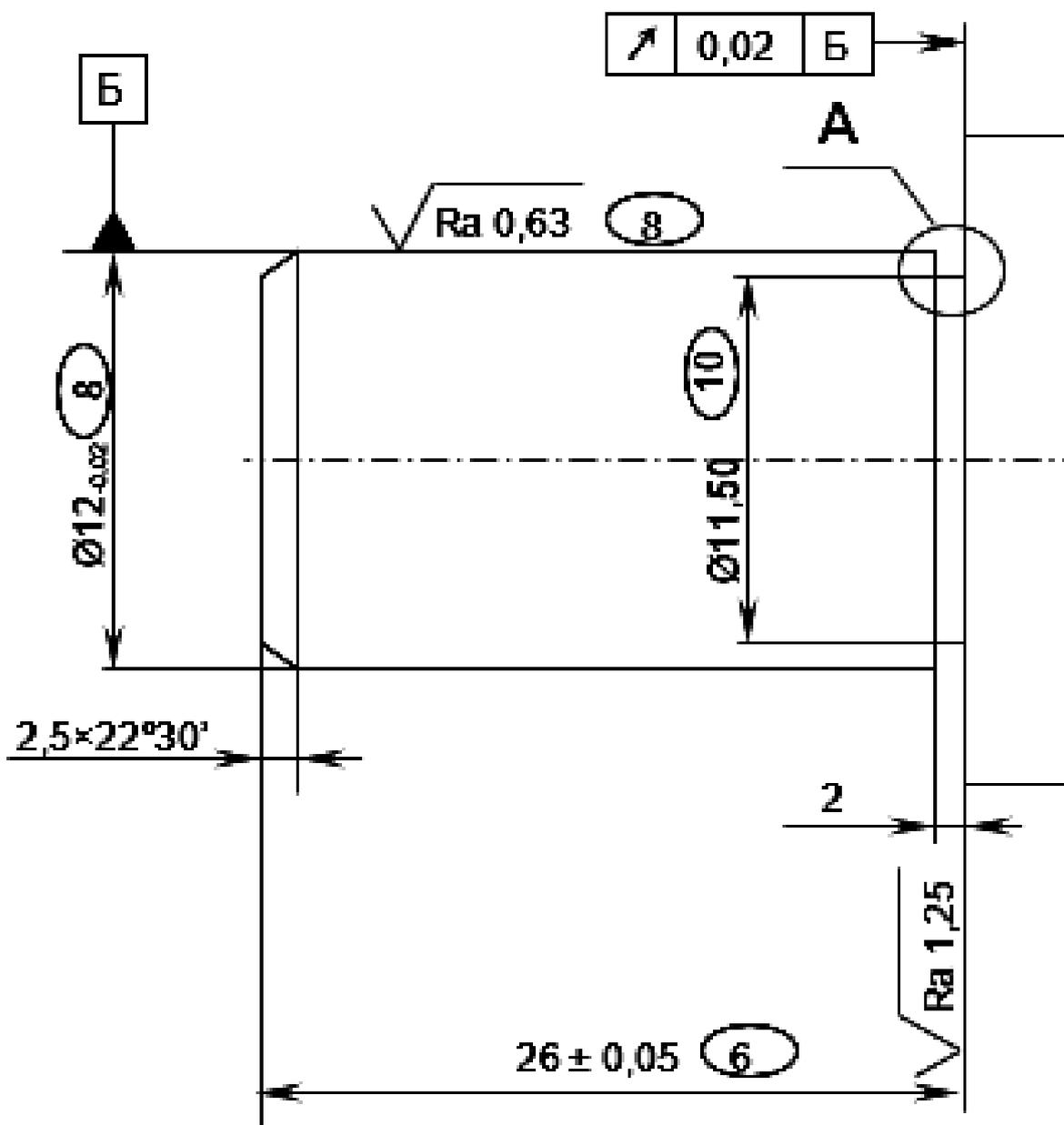


Рис. 5. Модель идентификации значимости приоритета (i) характеристик в конструкторско-технологической документации: 1 – Н14, h14, ±IT14/2; 2 – неуказанная значимость характеристик – (3)

Результативность деятельности организации определяется выполнением требований потребителя, а эффективность – наименьшими затратами на их выполнение. Для обеспечения удовлетворенности конечного потребителя следует повышать эффективность владения им продукцией в течение ее жизненного цикла («стоимость владения

продукции»). Для устойчивого успеха организации необходимо в рамках реализации проекта увеличить долю рынка привлечением конечного потребителя большей чем у конкурентов интегральной прибылью (разность между получаемым доходом и суммой затрат на первоначальное приобретение и эксплуатацию продукции).

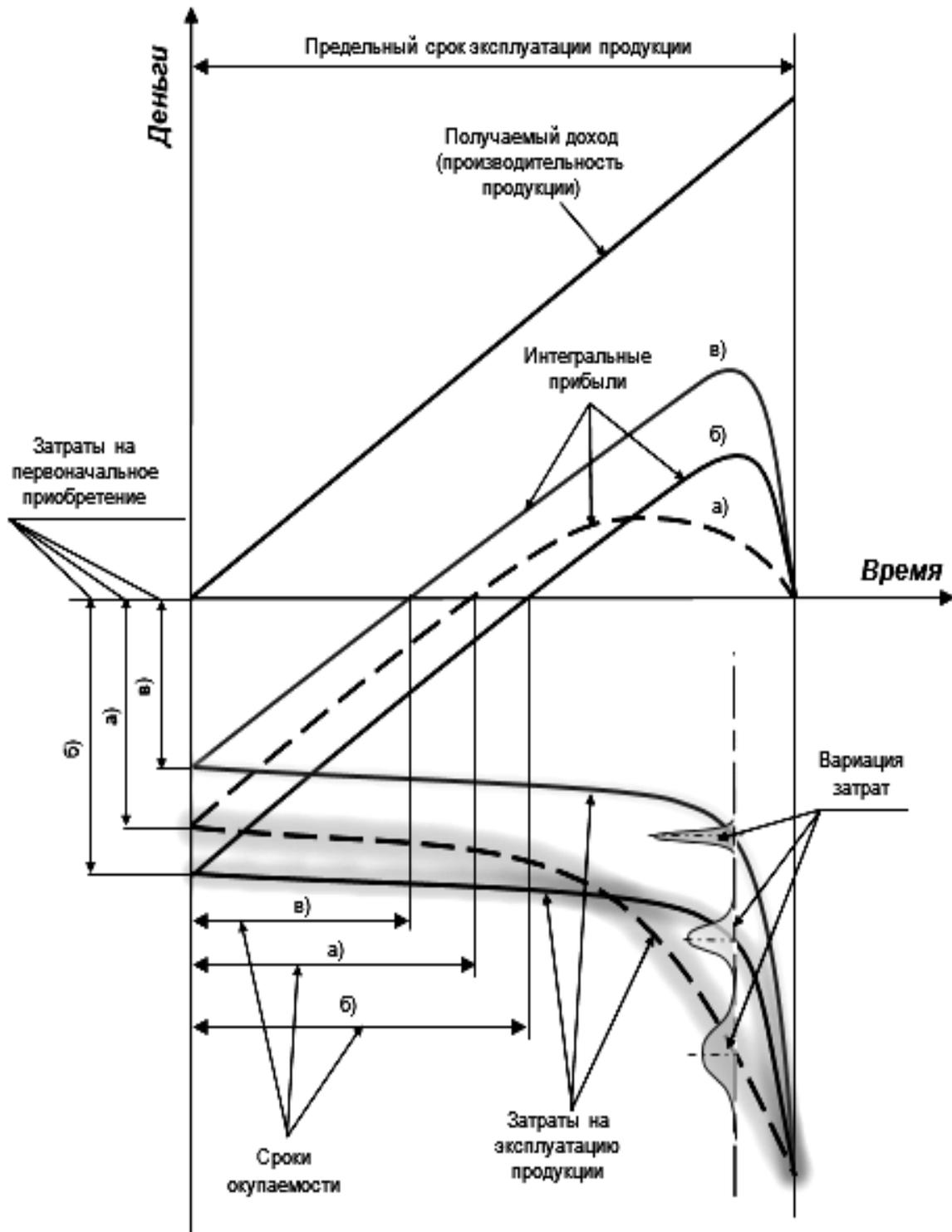


Рис. 6. Модель оптимизации эффективности для организации в проектах и для конечного потребителя в жизненном цикле продукции на основе приоритизации характеристик и оптимизации вариации при риск-ориентированном подходе: *а* – исходный /традиционный вариант приобретения; *б* – вариант приобретения на основе стратегии «качество не может быть дешево»; *в* – вариант приобретения на основе стратегии «приоритизации характеристик и оптимизации вариации»

На рис. 6 представлены возможные варианты оптимизации эффективности приобретения и использования продукции с учетом особенностей формулирования технического задания на закупку:

а) исходный/традиционный вариант выбора продукции на основе детерминированного подхода, например, с целью экономии средств;

б) вариант выбора исходя из стратегии «качество не может быть дешево», т. е. когда решение принимается на основе, например, популярности бренда и/или с установлением требований без использования вероятностного подхода;

в) вариант выбора на основе применения у организаций поставщика и пользователя стратегий «систем приоритизации характеристик и оптимизации их вариаций», т. е. при реализации в системах менеджмента организаций риск-ориентированного проектно-процессного подхода.

Примечания

1. В примере (см. рис. 6) условно рассматривается однотипная продукция, которая имеет: единые требования потребителя к получаемому доходу (производительности продукции); одинаковые технические и технологические решения для продукции и процессов изготовления; единый тип/серийность производства; одинаковый заданный предельный срок эксплуатации продукции (законодательное ограничение, экономическая целесообразность, срок обновления и др.).

2. В затраты на эксплуатацию продукции следует включать: расходные материалы, например, топливо, смазка; затраты на обслуживание, ремонт, восстановление; простои из-за невозможности эксплуатации (из-за обслуживания, ремонта и др.).

В модели оптимизации эффективности учитываются: жизненный цикл продукции, который рассматривается от приобретения до момента дальнейшей экономической нецелесообразности использования (физический и/или моральный износ); положение точек безубыточности приобретения для потре-

бителя; интегральная прибыль как критерий эффективности для организации поставщика и пользователя; варианты различия вариаций характеристик: использование допускового мышления при традиционном подходе, априори предполагая, что более дорогая продукция имеет более стабильное качество, оптимизация вариации в зависимости от приоритета.

Представленная на рис. 6 модель оптимизации эффективности для организации в проектах и для конечного потребителя в жизненном цикле продукции при ее производстве [2, 4], при прочих равных условиях позволяет получать для конечного потребителя наибольшую интегральную прибыль и увеличить доход организации-изготовителя за счет роста доли рынка. Интегральная прибыль является наибольшей при реализации изменений в процессах систем менеджмента организаций поставщиков и пользователей на основе риск-ориентированного проектно-процессного подхода.

Заключение

Разработанные методология и модели направлены на устранение основных проблем: неконкурентоспособный уровень качества продукции и качества производства; низкая эффективность и производительность труда. Методология и методы позволяют результативно и эффективно управлять рисками технических и технологических систем, проектов и организаций на основе системной взаимосвязи категорирования последствий отказов и научно-технической базы знаний их идентифицированных первопричин путем введения в конструкторско-технологическую документацию характеристики идентификаторов классификации значимости последствий. Разработанные методология и модели были применены при создании

инновационных государственных стандартов на системы менеджмента и методики достижения эффективности СТБ 16949, СТБ В 15.004, СТБ 1505,

СТБ 1506, СТБ 2450, СТБ 2484, СТБ 2582, учебных пособий [5], а также используются в практике машиностроения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / Н. А. Махутов [и др.]; под общ. ред. Н. А. Махутова – Москва: Знание, 2018. – 1016 с.
2. Научно-методические основы проектирования. Системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография / А. Н. Панов [и др.]; под общ. ред. А. Н. Панова. – Минск: БГАТУ, 2009. – 482 с.
3. **Панов, А. Н.** Перспективное планирование качества продукции – основа для проектирования технологических процессов при риск-ориентированном подходе / А. Н. Панов, Ж. А. Мрочек, А. М. Пашкевич // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 1. – С. 31–41.
4. **Панов, А. Н.** Риск-ориентированное проектирование в машиностроении / А. Н. Панов // Стандарты и качество. – 2021. – № 8. – С. 106–108.
5. Технологическое обеспечение машиностроительного производства: учебное пособие / В. А. Логвин [и др.]; под ред. Ж. А. Мрочека. – Минск: РИВШ, 2021. – 560 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 13 декабря 2021 года

Александр Николаевич Панов, канд. техн. наук, ЮРС-РУСЬ. E-mail: a.panov@tut.by.

Жорж Адамович Мрочек, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: Vikt@bntu.by.

Виктор Михайлович Пашкевич, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. E-mail: pvm@bk.ru.

Aleksandr Nikolayevich Panov, PhD (Engineering), URS-Rus, Ltd. E-mail: a.panov@tut.by.

Zhorzh Adamovich Mrochek, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: vikt-ipf@rambler.ru.

Viktor Mikhailovich Pashkevich, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: pvm@bk.ru.

DOI: 10.53078/20778481_2022_1_64

УДК 629.3

В. П. Тарасик

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСТРЕННОГО ТОРМОЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ НА ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИПА «МИКСТ»

V. P. Tarasik

TECHNIQUE FOR SIMULATING VEHICLE EMERGENCY BRAKING ON A «MIXT»-TYPE BEARING SURFACE

Аннотация

Предложена методика моделирования экстренного торможения автомобиля для случая, когда левые и правые колеса находятся в разных условиях по сцеплению с опорной поверхностью. Разработаны математические модели процесса движения автомобиля при торможении и режимов функционирования элементов тормозной системы под управлением АБС. Приведены графики результатов моделирования. Показана эффективность использования АБС.

Ключевые слова:

тормозная система автомобиля, тормозные моменты передних и задних колес, коэффициент распределения тормозных моментов, тормозной путь и замедление при торможении, коэффициент сцепления, скольжение колеса, блокировка колеса тормозом, антиблокировочная система управления тормозными моментами.

Для цитирования:

Тарасик, В. П. Методика моделирования экстренного торможения автомобиля на опорной поверхности типа «микст» / В. П. Тарасик // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 64–75.

Abstract

A technique for simulating vehicle emergency braking is proposed for the case when its left and right wheels are running under different conditions in terms of wheel/bearing surface adhesion. Mathematical models for the process of vehicle movement during braking, as well as for the modes of operation of the braking system elements under ABS control, have been developed. Graphs of simulation results are presented. The effectiveness of the ABS system use is shown.

Keywords:

vehicle braking system, braking torques of front and rear wheels, braking torque distribution coefficient, braking distance and deceleration when braking, adhesion coefficient, wheel slip, wheel blocking by the brake, anti-lock braking torque control system.

For citation:

Tarasik, V. P. Technique for simulating vehicle emergency braking on a «mixt»-type bearing surface / V. P. Tarasik // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 64–75.

Опорную поверхность дороги с различающимися условиями сцепления левых и правых колес автомобиля принято называть поверхностью типа «микст». Продольные и поперечные реакции дороги на левые и правые колеса

при торможении автомобиля в этом случае существенно различаются, соответственно, различаются и реализуемые тормозные моменты этих колес, что приводит к возникновению разворачивающего момента и заносу корпуса ав-

томобиля. Происходит потеря устойчивости прямолинейного движения автомобиля, сопровождаемая увеличением тормозного пути. Создается аварийная ситуация для транспортного потока на дороге.

Прогнозирование характеристик и параметров экстренного торможения на поверхности типа «микст» возможно на основе компьютерного моделирования. Рассмотрим предлагаемую методику моделирования и исследования.

Динамическую модель автомобиля представим в виде сложной многомерной системы, состоящей из взаимодействующих компонентов и находящейся под воздействием внешней среды. Модель экстренного торможения и ее по-

дробное обоснование приведены в [1]. Дополним эту модель компонентом, необходимым для отображения процесса заноса автомобиля при торможении. Предлагаемая модель приведена на рис. 1. Ее компонент, представленный на рис. 1, д, предназначен для получения уравнений вращательного движения относительно вертикальной оси z и бокового смещения в направлении поперечной оси y .

На основе сформированной динамической модели составим систему дифференциальных уравнений математической модели торможения автомобиля:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= \frac{-\sum_i (M_{\tau i} + M_{f i})/r_{k0} - F_w}{\delta_{п.м} m_a} + v_y \omega_z; \quad i = 1l, 1p, 2l, 2p; \\ \frac{dv_y}{dt} &= \frac{F_{vy}}{m_a} - v_x \omega_z; \\ \frac{d\omega_z}{dt} &= \frac{F_{\omega z}}{J_z}; \\ \frac{d\omega_y}{dt} &= \frac{-(\Delta F_{z1} l_1 + \Delta F_{z2} l_2) + \sum_i M_{\tau i}}{J_y}; \\ \frac{d\omega_{ki}}{dt} &= \frac{R_{xi} r_{k0} - (M_{\tau i} + M_{f i})}{J_{ki}}; \quad i = 1l, 1p, 2l, 2p, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где v_x, v_y – продольная и поперечная составляющие скорости автомобиля, м/с; $M_{\tau i}, M_{f i}$ – соответственно тормозной момент и момент сопротивления качению i -го колеса автомобиля, Н·м; r_{k0} – радиус качения колеса, м; F_w – сила сопротивления воздуха, Н; $m_a, \delta_{п.м}$ – масса автомобиля, кг, и коэффициент приведенной массы; ω_z, J_z – угловая скорость вращения,

рад/с, и момент инерции корпуса автомобиля относительно вертикальной оси z , кг·м²; ω_y, J_y – угловая скорость продольных колебаний поддресоренной массы кузова, рад/с, и момент инерции относительно поперечной оси y , кг·м²; $\Delta F_{z1}, \Delta F_{z2}$ – изменения суммарных усилий упругих и диссипативных элементов подвески передних и задних колес при продольных колебаниях поддресоренной массы, Н; l_1, l_2 – про-

дольные координаты осей вращения колес относительно центра масс кузова, м;
 ω_{ki}, J_{ki} – угловая скорость вращения,

рад/с, и момент инерции i -го колеса, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; R_{xi} – продольная реакция дороги на i -е колесо, Н.

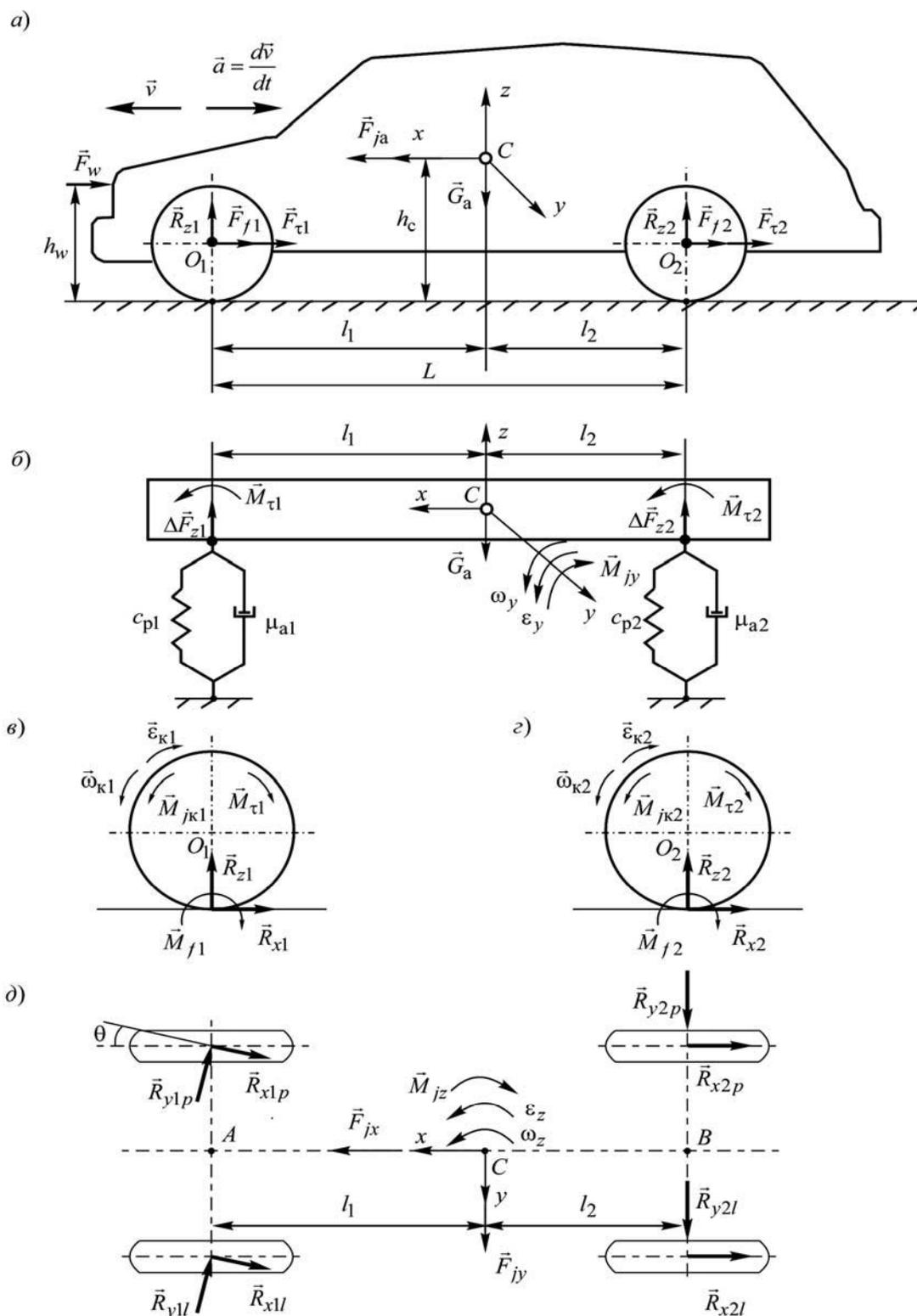


Рис. 1. Динамические модели автомобиля: поступательного движения корпуса (а); продольных угловых колебаний кузова (б); вращательных движений передних и задних колес (в) и (г); заноса автомобиля (д)

Функции $F_{\omega z}$ и F_{vy} вычисляются по формулам

$$F_{\omega z} = (R_{x1l} - R_{x1p})B_k \cos \theta + (R_{x1l} + R_{x1p})l_1 \sin \theta + (R_{y1l} - R_{y1p})B_k \sin \theta - (R_{y1l} + R_{y1p})l_1 \cos \theta + (R_{x2l} - R_{x2p})B_k + (R_{y2l} + R_{y2p})l_2 / J_z; \quad (2)$$

$$F_{vy} = (M_{\tau 1l} + M_{\tau 1p} + M_{f1l} + M_{f1p}) \sin(\theta) / r_{k0} - (R_{y1l} + R_{y1p}) \cos(\theta) + R_{y2l} + R_{y2p}, \quad (3)$$

где θ – угол поворота управляемых колес автомобиля, рад; B_k – половина колеи, м; $R_{y1l}, R_{y1p}, R_{y2l}, R_{y2p}$ – поперечные реакции на левые и правые колеса соответственно, Н.

Вычисления функций $M_{\tau i}, M_{f i}, R_{xi}, R_{yi}$ осуществляются по формулам, приведенным в [1].

На режиме экстренного торможения происходит упругое и внешнее скольжение тормозящих колес относительно опорной поверхности дороги в продольном и поперечном направлениях. Коэффициент сцепления колес с дорогой при этом изменяется в широких пределах и зависит от величины их скольжения. Данное явление изучают экспериментально. При этом получают графики зависимостей удельной продольной реакции дороги на колесо γ_{Rx} и удельной поперечной реакции γ_{Ry} в зависимости от величины коэффициента скольжения λ_{τ} . Как известно [2, 3], экстремумы функций $\gamma_{Rx} = f(\lambda_{\tau})$ и $\gamma_{Ry} = f(\lambda_{\tau})$ представляют собой максимальные значения соответственно продольного $\varphi_{x \max}$ и поперечного $\varphi_{y \max}$ коэффициентов сцепления колеса с дорогой.

Коэффициент скольжения i -го колеса $\lambda_{\tau i}$ определяется по формуле

$$\lambda_{\tau i} = 1 - \frac{\omega_{ki} r_{k0i}}{v_a}, \quad (4)$$

где ω_{ki}, r_{k0i} – угловая скорость вращения и радиус качения i -го колеса соответственно; v_a – скорость автомобиля, м/с.

Удельные продольные и поперечные реакции дороги на колесо представляют собой соотношения

$$\gamma_{Rx} = \frac{R_x}{R_z}; \quad (5)$$

$$\gamma_{Ry} = \frac{R_y}{R_z}, \quad (6)$$

где R_x, R_y – соответственно продольная и поперечная реакции скользящего колеса при торможении, Н; R_z – нормальная реакция, Н.

Для вычисления функции $\gamma_{Rx} = f(\lambda_{\tau})$ используем зависимости, полученные М. Буркхардтом (M. Burckhardt) на основе экспериментальных исследований процессов скольжения колес в различных дорожных условиях [4]. Их математическое представление дается эмпирической формулой

$$\gamma_{Rx} = c_1(1 - e^{-c_2 \lambda_{\tau}}) - c_3 \lambda_{\tau}, \quad (7)$$

где c_1, c_2, c_3 – коэффициенты.

Для сухого асфальта $c_1 = 1,2801$, $c_2 = 23,990$, $c_3 = 0,520$; для мокрого – $c_1 = 0,857$, $c_2 = 33,822$, $c_3 = 0,347$.

На основе функции $\gamma_{Rx} = f(\lambda_{\tau})$ определяется изменение продольной

реакции дороги на скользящие колеса

$$R_x = \gamma_{Rx} R_z. \quad (8)$$

Для описания зависимости $\gamma_{Ry} = f(\lambda_\tau)$ используем график, приведенный в [5, с. 627]. Аппроксимацию этого графика представим в виде полинома седьмого порядка

$$\begin{aligned} \gamma_{Ry} = & b_0 + b_1 \lambda_\tau + b_2 \lambda_\tau^2 + b_2 \lambda_\tau^3 + \\ & + b_2 \lambda_\tau^4 + b_2 \lambda_\tau^5 + b_2 \lambda_\tau^6 + b_2 \lambda_\tau^7, \end{aligned} \quad (9)$$

где $b_0, b_1, b_2, \dots, b_7$ – коэффициенты полинома.

Предположим, что опорная поверхность левых колес автомобиля имеет коэффициент сцепления $\varphi_{y \max} = 0,7$, а правых колес – $\varphi_{y \max} = 0,3$.

Для первого варианта опорной поверхности получены следующие значения коэффициентов полинома $\gamma_{Ry} = f(\lambda_\tau)$: $b_0 = 0,69977$; $b_1 = 0,49857$; $b_2 = -17,178$; $b_3 = 73,148$; $b_4 = -151,38$; $b_5 = 165,83$; $b_6 = -91,462$; $b_7 = 19,900$.

Для второго варианта: $b_0 = 0,30033$; $b_1 = 0,21398$; $b_2 = -7,3725$; $b_3 = 31,394$; $b_4 = -64,972$; $b_5 = 71,171$; $b_6 = -39,254$; $b_7 = 8,5406$.

На рис. 2 представлены графики за-

висимостей $\gamma_{Rx} = f(\lambda_\tau)$ и $\gamma_{Ry} = f(\lambda_\tau)$ для опорных поверхностей при $\varphi_{x \max} = 0,8$, $\varphi_{y \max} = 0,7$ (мокрый асфальт); $\varphi_{x \max} = 0,35$, $\varphi_{y \max} = 0,3$ (обочина дороги). Известно, что у одной и той же опорной поверхности значение $\varphi_{y \max}$ несколько меньше $\varphi_{x \max}$.

Нарастание тормозных моментов при включении тормозов представим выражением

$$M_{\tau i} = \begin{cases} M_{\tau i \max} t / t_H & \text{при } t < t_H; \\ M_{\tau i \max} & \text{при } t \geq t_H, \end{cases} \quad (10)$$

где t_H – время нарастания тормозных моментов ($t_H = 0,4 \dots 0,5$ с [2]).

Тормозной момент задних тормозов

$$M_{\tau 2} = M_{\tau 1} (1 - \beta_\tau) / \beta_\tau, \quad (11)$$

где β_τ – коэффициент распределения тормозных моментов:

$$\beta_\tau = \frac{M_{\tau 1 \max}}{M_{\tau 1 \max} + M_{\tau 2 \max}}. \quad (12)$$

Максимальные моменты по сцеплению передних и задних тормозных механизмов $M_{\tau 1 \max}$ и $M_{\tau 2 \max}$ вычисляются по формулам

$$M_{\tau 1 \max} = (m_a g \varphi_{x \max} (l_2 + h_c \varphi_{x \max}) r_{k0}) / L; \quad (13)$$

$$M_{\tau 2 \max} = (m_a g \varphi_{x \max} (l_1 - h_c \varphi_{x \max}) r_{k0}) / L, \quad (14)$$

где $\varphi_{x \max}$ – максимальное значение коэффициента сцепления колеса с опорной поверхностью дороги; h_c – высота центра масс автомобиля, м; L – колесная база автомобиля, м.

Применение предлагаемой методики рассмотрим на примере моделирования экстренного торможения легково-

го автомобиля, параметры которого приведены в [1]. При моделировании процесса торможения будем предполагать, что тормозная система укомплектована антиблокировочной системой (АБС). Моделирование процесса управления тормозными моментами посредством АБС рассмотрено в [1].

Применение АБС в тормозной системе позволяет избежать блокировок колес при экстренных торможениях и обеспечить ее функционирование в области высоких значений коэффициентов сцепления φ_x и φ_y (рис. 2). Режим управления обычно настраивают на поддержание коэффициента скольжения λ_τ в пределах 0,1...0,25.

На рис. 3, а приведены графики изменения коэффициента скольжения колес λ_τ при экстренном торможении автомобиля в условиях «микст», а на рис. 3, б – графики тормозных моментов M_τ , воздействующих на соответствующие колеса.

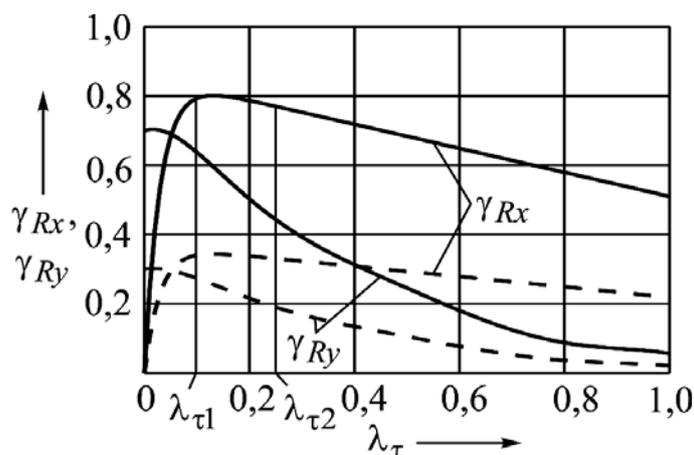


Рис. 2. Графики удельных продольных γ_{Rx} и поперечных γ_{Ry} реакций дороги в зависимости от коэффициента скольжения колеса λ_τ при торможении

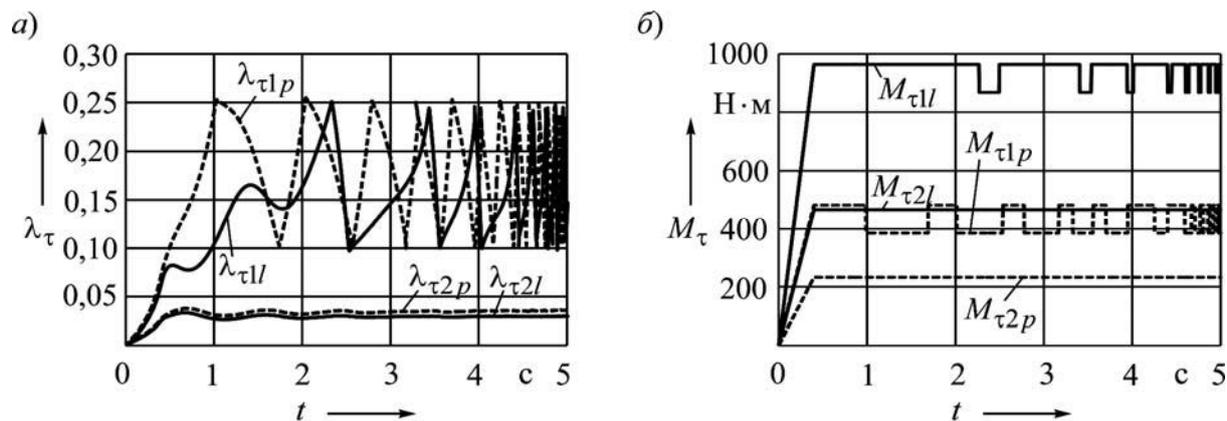


Рис. 3. Графики коэффициента скольжения колес λ_τ (а) и тормозных моментов M_τ (б) при экстренном торможении автомобиля в условиях «микст»

Из этих графиков видно, что АБС регулярно вступает в действие, снижая или повышая значения тормозных мо-

ментов передних колес $M_{\tau 1l}$ и $M_{\tau 1p}$. Снижение осуществляется, как только

коэффициент скольжения $\lambda_{\tau 1l}$ или $\lambda_{\tau 1p}$ начинает превышать величину $\lambda_{\tau \max} = 0,25$. В результате скольжение снижается и предотвращается возможность блокировки этих колес. Когда величины коэффициентов скольжения $\lambda_{\tau 1l}$ и $\lambda_{\tau 1p}$ достигают предельно низкого уровня ($\lambda_{\tau \min} = 0,1$), АБС восстанавливает расчетные значения моментов $M_{\tau 1l}$ и $M_{\tau 1p}$. Таким образом, поддерживается эффективный диапазон скольжения колес, при котором достигаются максимально возможные средние значения коэффициентов сцепления колес с опорной поверхностью (согласно графикам γ_{R_x} на рис. 2). Частота формирования сигналов управления АБС возрастает по мере снижения скорости автомобиля и может достигать значений 30...40 Гц. Наибольшая частота характерна для тормозных механизмов колес, находящихся на опорной поверхности с низким коэффициентом

сцепления (см. рис. 3, б).

Тормозные моменты задних тормозов $M_{\tau 2l}$ и $M_{\tau 2p}$, как видно из уравнений (10)–(14), существенно ниже тормозных моментов передних колес (см. рис. 3, б), т. к. при торможении под воздействием силы инерции происходит перераспределение нормальных реакций на колеса R_{z1} и R_{z2} (передние колеса нагружаются, а задние разгружаются). Скольжение задних колес в исследуемом примере оказалось значительно меньше настраиваемых пределов АБС (см. рис. 3, а), поэтому необходимость управления тормозными моментами $M_{\tau 2l}$ и $M_{\tau 2p}$ не возникла.

Изменение нормальных реакций во время торможения носит колебательный характер, что обусловлено упругими элементами подвески кузова (рис. 4, а). Кузов автомобиля совершает продольные угловые колебания, как видно из рис. 4, б.

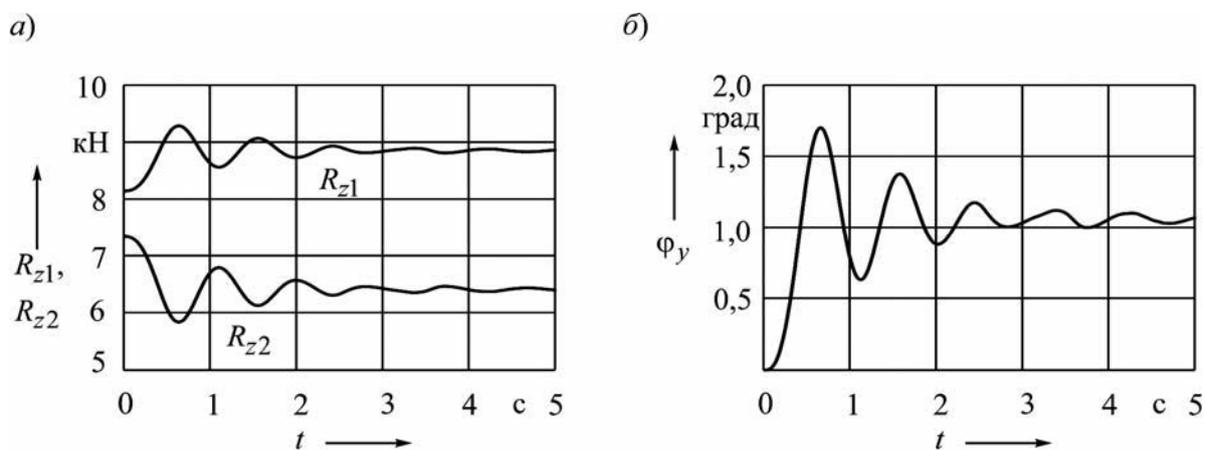


Рис. 4. Изменения нормальных реакций дороги на передние и задние колеса автомобиля (а) и продольные колебания кузова (б)

На рис. 5, а представлены графики изменения угловых скоростей вращения передних ω_{k1l} , ω_{k1p} и задних ω_{k2l} , ω_{k2p} колес, а на рис. 5, б – их угловых замедлений ε_{k1l} , ε_{k1p} , ε_{k2l} , ε_{k2p}

в процессе торможения. Вследствие дискретных сигналов управления тормозными моментами передних колес посредством АБС их угловые скорости и замедления колеблются в довольно широких пределах, особенно замедления.

Однако движение автомобиля плавное, равномерно замедленное. На рис. 6 приведены графики изменения скорости v_a и перемещения s_a во время торможения.

При экстренном торможении в условиях «микст» непременно возникает занос автомобиля. Рассмотрим причины возникновения заноса и возможности его минимизации с целью предотвращения аварийных условий движения.

Занос в данном случае возникает из-за значительной разности реализуемых тормозных моментов левыми и правыми колесами, что обусловлено существенным различием коэффициентов сцепления их с дорогой. В результа-

те автомобиль начинает поворачиваться относительно вертикальной оси z и смещаться в боковом направлении противоположно оси y .

Известно [2, 3], что для устранения возникшего заноса или снижения его величины необходимо поворачивать передние управляемые колеса в сторону начавшегося заноса.

На рис. 7 показаны характеристики изменения угловой скорости вращения ω_z и угла поворота корпуса автомобиля φ_z относительно вертикальной оси z при заносе, а также график управления углом поворота колес $\theta = f(t)$.

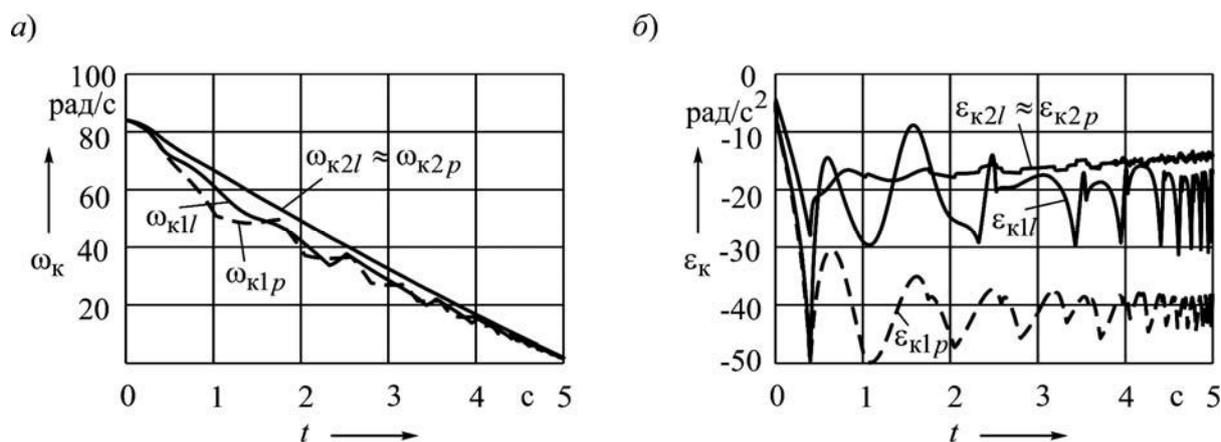


Рис. 5. Графики угловых скоростей вращения (а) и замедлений (б) передних и задних колес при экстренном торможении автомобиля в условиях «микст»

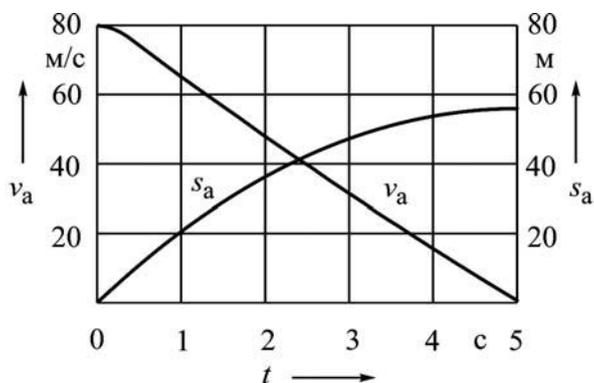


Рис. 6. Изменения скорости v_a и перемещения s_a автомобиля при экстренном торможении в условиях «микст»

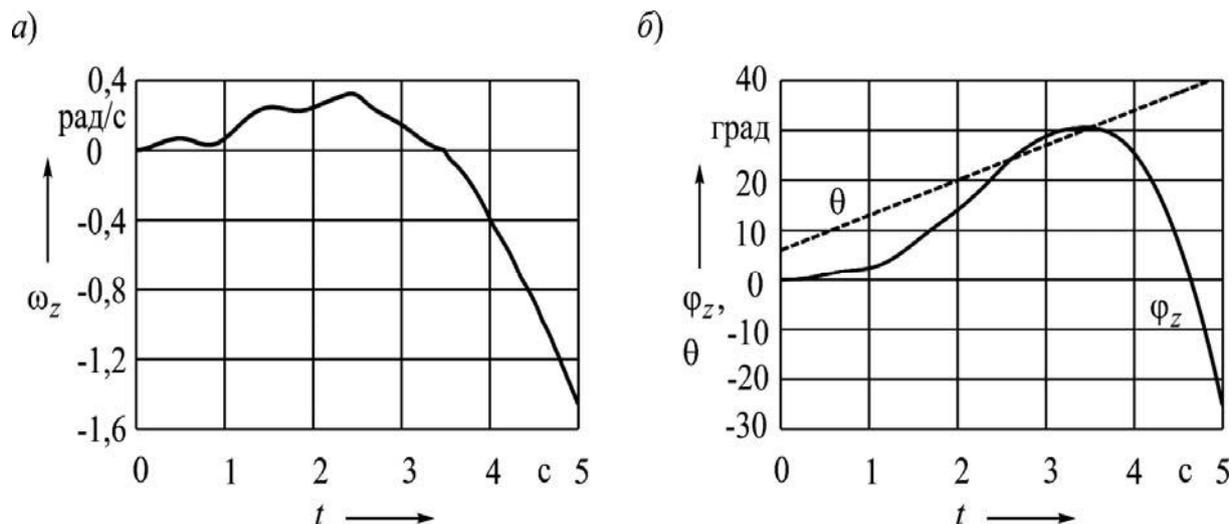


Рис. 7. Графики угловой скорости поворота корпуса автомобиля ω_z (а), углов поворота управляемых колес θ и корпуса автомобиля φ_z (б)

Использована линейная функция управления $\theta = f(t)$

$$\theta = \theta_0 + at, \quad (15)$$

где θ_0 – начальное значение угла поворота передних управляемых колес; a – постоянный коэффициент.

Приведенные графики на рис. 7 получены при $\theta_0 = 6$ град, $a = 7$ град/с.

В опорной плоскости колес на корпус автомобиля оказывают воздействия продольные реакции дороги на передние R_{x1l} , R_{x1p} и задние R_{x2l} , R_{x2p} колеса, а также соответствующие им поперечные реакции R_{y1l} , R_{y1p} , R_{y2l} , R_{y2p} (см. рис. 1, д). Так как движение автомобиля неравномерное, возникают силы инерции F_{jx} , F_{jy} и инерционный момент M_{jz} .

Значения продольных и поперечных реакций непрерывно изменяются вследствие упругих свойств шин и изменения коэффициентов сцепления в зависимости от величины их скольжения. На рис. 8, а приведены графики

продольных реакций R_{x1l} , R_{x1p} , R_{x2l} , R_{x2p} , а на рис. 8, б – графики удельных продольных реакций γ_{Rx1l} , γ_{Rx1p} , γ_{Rx2l} , γ_{Rx2p} .

На начальном этапе процесса торможения при нарастании тормозных моментов на интервале времени t_H происходит упругое скольжение колес, обусловленное их упругими свойствами, и одновременно возрастает внешнее скольжение относительно опорной поверхности. В результате продольные реакции постепенно возрастают и приближаются к своим максимальным значениям. Дальнейшее их изменение незначительно и обусловлено в основном величиной скольжения колес, поддерживаемой АБС в заданных узких пределах.

Значения поперечных реакций R_{y1l} , R_{y1p} , R_{y2l} , R_{y2p} также непрерывно изменяются. На рис. 9, а представлены графики этих реакций, а на рис. 9, б – графики удельных поперечных реакций γ_{Ry1l} , γ_{Ry1p} , γ_{Ry2l} , γ_{Ry2p} .

Очевидно, что характер изменения поперечных и продольных реакций существенно различен. Во-первых,

направления векторов поперечных реакций зависят от направления вращения корпуса автомобиля в плоскости дороги, т. е. от направления угловой

скорости ω_z . Это легко проследить из сопоставления графиков на рис. 9, а и рис. 7, а.

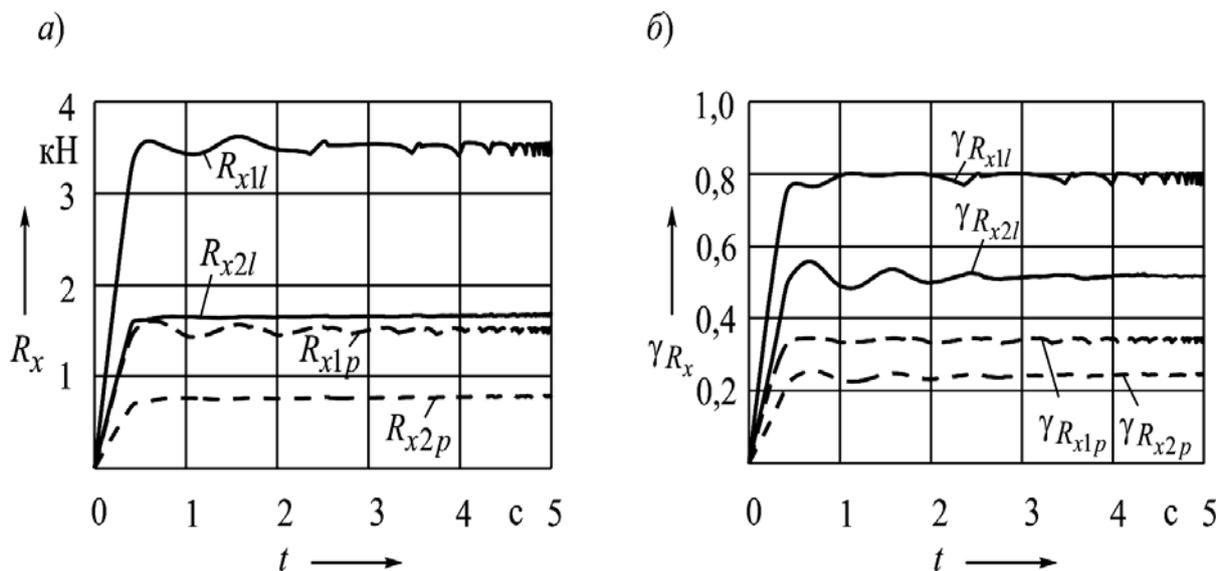


Рис. 8. Графики изменения продольных (а) и удельных продольных (б) реакций дороги на передние и задние колеса в условиях «микст»

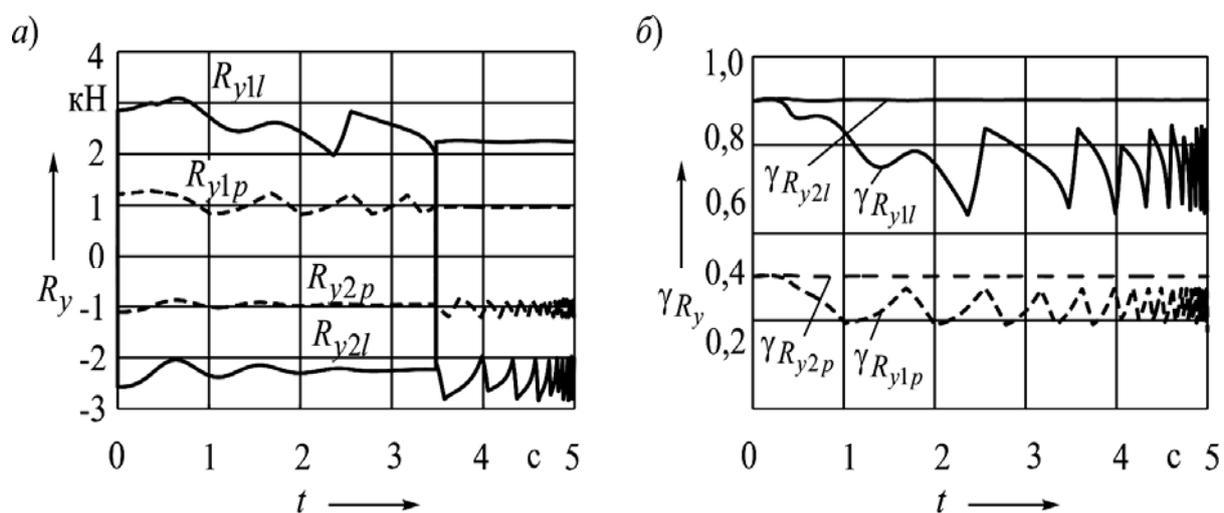


Рис. 9. Графики изменения поперечных (а) и удельных поперечных (б) реакций дороги на передние и задние колеса в условиях «микст»

На начальном этапе торможения в интервале времени $\Delta t_1 = 0 \dots 3,75$ с угловая скорость $\omega_z > 0$, поэтому значения

поперечных реакций на передних колесах R_{y1l} и R_{y1p} положительны, а на задних R_{y2l} и R_{y2p} – отрицательны

(см. рис. 9, а). Их направления в этом случае соответствуют рис. 1, д. Затем вследствие продолжающегося увеличения угла поворота управляемых колес θ угловая скорость начинает снижаться и становится отрицательной ($\omega_z < 0$), векторы поперечных реакций изменяют направления на противоположные и величина заноса уменьшается. При этом угол поворота корпуса автомобиля φ_z постепенно снижается, а затем возникает поворот его в противоположную сторону (см. рис. 7, б). Одновременно с вращением корпус постепенно смещается в боковом направлении противоположно оси y .

Направления векторов поперечных реакций R_{y1l} , R_{y1p} , R_{y2l} , R_{y2p} соответствуют начальному этапу торможения, когда происходит процесс развития заноса автомобиля. Направления этих векторов привязаны к направлению поперечной оси корпуса y (см. рис. 1, д).

Характерной особенностью протекания графиков поперечных реакций является значительная величина их колебаний. Это обусловлено особенностью характеристики γ_{Ry} , которая с увеличением скольжения колеса быстро снижается (см. рис. 2). Максимальная величина соответствует отсутствию скольжения, а с увеличением коэффициента скольжения λ_τ значение γ_{Ry} резко падает. При блокировке колеса, когда $\lambda_\tau = 1$, величина γ_{Ry} приближается к нулю.

Как отмечалось ранее, при моделировании процесса торможения характеристика АБС была настроена на поддержание скольжения колес в пределах $\lambda_\tau = 0,1 \dots 0,25$. При этом изменение γ_{Rx} находится в диапазоне $\Delta\gamma_{Rx} \approx 0,77 \dots 0,80$, в то время как интервал колебания γ_{Ry} составляет $\gamma_{Ry} \approx 0,44 \dots 0,64$, т. е. примерно в 1,45 раза больше (см. рис. 2). Поэтому для графиков поперечных реакций R_{y1l} , R_{y1p} , R_{y2l} , R_{y2p} характерны большие колебания, чем и объясняется значительное снижение поперечной устойчивости автомобиля при увеличении скольжения колес. Особенно хорошо это иллюстрируется графиками удельных поперечных реакций γ_{Ry1l} , γ_{Ry1p} , γ_{Ry2l} , γ_{Ry2p} (см. рис. 9, б).

Предложенная методика моделирования экстренного торможения автомобиля в условиях «микст» позволяет в процессе проектирования тормозной системы осуществлять анализ эффективности принимаемых конструктивных решений по параметрам тормозных механизмов, по выбору схемы установки элементов АБС на автомобиле (датчиков, модуляторов) и их связей с тормозными механизмами колес [3, с. 198], алгоритма и параметров программы функционирования электронного блока управления АБС, а также выполнять исследования устойчивости и управляемости автомобиля при торможении в различных дорожных условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасик, В. П. Методика моделирования экстренного торможения автомобиля / В. П. Тарасик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 4. – С. 76–87.
2. Гришкевич, А. И. Автомобили. Теория: учебник для вузов / А. И. Гришкевич. – Минск: Вышэйшая школа, 1986. – 208 с.

3. **Ларин, В. В.** Теория движения полноприводных колесных машин: учебник / В. В. Ларин. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 391 с.

4. **Kiencke, U.** Automotive Control Systems For Engine, Driveline, and Vehicle / U. Kiencke, L. Nielsen. – Berlin: Springer, 2005. – 512 p.

5. Автомобильный справочник: пер. с англ. – 1-е изд. – Москва: За рулем, 2002. – 896 с.

Статья сдана в редакцию 23 декабря 2021 года

Владимир Петрович Тарасик, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

Vladimir Petrovich Tarasik, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

DOI: 10.53078/20778481_2022_1_76

УДК 629.113

В. П. Тарасик, О. В. Пузанова

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ИСПЫТАНИЙ «ПЕРЕСТАВКА» ПРИ ОЦЕНКЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЯ

V. P. Tarasik, O. V. Puzanova

SIMULATION OF EVASIVE MANEUVER TEST IN ASSESSING VEHICLE DRIVABILITY AND STABILITY

Аннотация

Предложены математическая модель и методика проведения имитации испытаний автомобиля при выполнении манёвра «переставка». На примере грузового автомобиля проведено исследование его управляемости и устойчивости. Приведены полученные графики, иллюстрирующие изменение параметров и характеристик движения в широком диапазоне скоростей.

Ключевые слова:

автомобиль, колесо, поперечная и продольная реакции дороги, сила инерции, инерционный момент, траектория движения автомобиля, курсовой угол, боковой увод колеса, боковое скольжение, крен кузова, плечо и ось крена.

Для цитирования:

Тарасик, В. П. Моделирование режима испытаний «переставка» при оценке управляемости и устойчивости автомобиля / В. П. Тарасик, О. В. Пузанова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 76–86.

Abstract

A mathematical model and a technique for simulating vehicle testing during the evasive maneuver called «elk test» are proposed. A truck of the category was taken as an example and its drivability and stability were studied. The resulting graphs are presented, which illustrate changes in the parameters and characteristics of truck motion over a wide range of speeds.

Keywords:

vehicle, wheel, lateral and longitudinal reactions of the road, inertial force, inertial moment, vehicle motion trajectory, approach angle, wheel slip, skidding, body roll, shoulder and axis of vehicle roll.

For citation:

Tarasik, V. P. Simulation of evasive maneuver test in assessing vehicle drivability and stability / V. P. Tarasik, O. V. Puzanova // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 76–86.

Управляемость и устойчивость – важнейшие свойства автомобиля, оказывающие существенное влияние на безопасность движения и возможность реализации высокой скорости и производительности при выполнении транспортной работы. Методики определения характеристик и параметров оценки

функциональных свойств управляемости и устойчивости автомобиля подробно рассмотрены в [1–3].

Технические требования к управляемости и устойчивости автотранспортных средств изложены в ГОСТ 31507–2012 [4]. В нём детально рассмотрены методы проведения ис-

пытаний по определению характеристик и оценочных показателей качества и эффективности управления. Предусмотрено множество типовых тестовых испытаний. Показатели и характеристики исследуемых свойств определяются в критических (нештатных) режимах движения автомобиля, подвергаемого испытаниям, с выполнением соответствующих маневров: смена полосы движения («переставка»), вход в поворот, рывок руля и др.

При создании нового автомобиля необходимо иметь возможность прогнозирования показателей и характеристик управляемого движения. Далее будет изложена методика имитационного моделирования тестового режима испытаний «переставка», предназначенного для определения максимальной скорости v_{Mmax} , при которой еще возможно выполнение данного маневра при сохранении устойчивого и управляемого движения без бокового опрокидывания и заноса мостов автомобиля. Полученное значение v_{Mmax} сравнивается с нормативным значением скорости выполнения исследуемого маневра v_{M} . Значения v_{M} для различных категорий и типов автомобилей, схема маршрута движения «переставка $s_{\text{п}} = 20 \text{ м}$ » и методика проведения испытаний приведены в [4].

Цель исследования

На основе математического моделирования на начальной стадии проектирования автомобиля оценить возможности прогнозирования параметров и характеристик управляемого и устойчивого движения на режиме «переставка».

Методика исследования

Исследования проведем на примере грузового автомобиля. Рассмотрим криволинейное движение автомобиля при смене полосы движения с правого

ряда в левый на плоскости дороги. Для адекватного отображения физических свойств объекта исследования и его взаимодействия с внешней средой используем многомерную динамическую модель, представленную на рис. 1, а, б.

Введем две системы координат: неподвижную XOY – в плоскости дороги и подвижную xuz , связанную с автомобилем. Ось x подвижной системы координат совместим с продольной осью автомобиля AB , ось y перпендикулярна ей, а ось z направлена вверх по отношению к опорной поверхности (см. рис. 1, а, б).

В динамической модели на рис. 1, а выделены поддрессоренная и неподдрессоренная массы $m_{\text{п}}$ и $m_{\text{н}}$. Их взаимодействие осуществляется посредством упругих и диссипативных элементов подвески. Наличие подвески требует учета наклонов поддрессоренной массы кузова относительно неподдрессоренной. Для этого используем угловую координату поперечного крена кузова $\lambda_{\text{кр}}$. Крен происходит под действием боковой силы инерции поддрессоренной массы \vec{F}_{jp} , приложенной в ее центре масс $C_{\text{п}}$.

Поддрессоренная масса $m_{\text{п}}$ находится в динамическом равновесии под действием следующей системы сил и моментов: силы тяжести поддрессоренной массы $m_{\text{п}}\vec{g}$; силы инерции $\vec{F}_{\text{jp}} = -m_{\text{п}}\vec{a}_y$; инерционного момента $\vec{M}_{\text{jl}} = -J_{\text{пл}}\ddot{\lambda}_{\text{кр}}$; суммарных вертикальной \vec{F}_{hz} и боковой \vec{F}_{ny} реакций неподдрессоренной массы $m_{\text{н}}$ в точке N оси крена и суммарного реактивного момента упругих элементов подвески \vec{M}_{p} . Значение реактивного момента определяется из выражения

$$M_{\text{p}} = M_{\text{p1}} + M_{\text{p2}} = (c_{\lambda 1} + c_{\lambda 2})\lambda_{\text{кр}}, \quad (1)$$

где $c_{\lambda 1}, c_{\lambda 2}$ – коэффициенты угловой

жёсткости передней и задней подвесок, определяемые по формуле

$$c_{\lambda i} = 0,5c_{pi}\eta_p B_{pi}^2; \quad (2)$$

c_{pi} – коэффициент жёсткости упругого элемента подвески i -го моста при вер-

тикальной деформации, Н/м; B_{pi} – расстояние между упругими элементами (рессорная база), м; η_p – коэффициент, учитывающий увеличение жёсткости упругого элемента при его скручивании в поперечной плоскости автомобиля, $\eta_p = 1,05 \dots 1,25$.

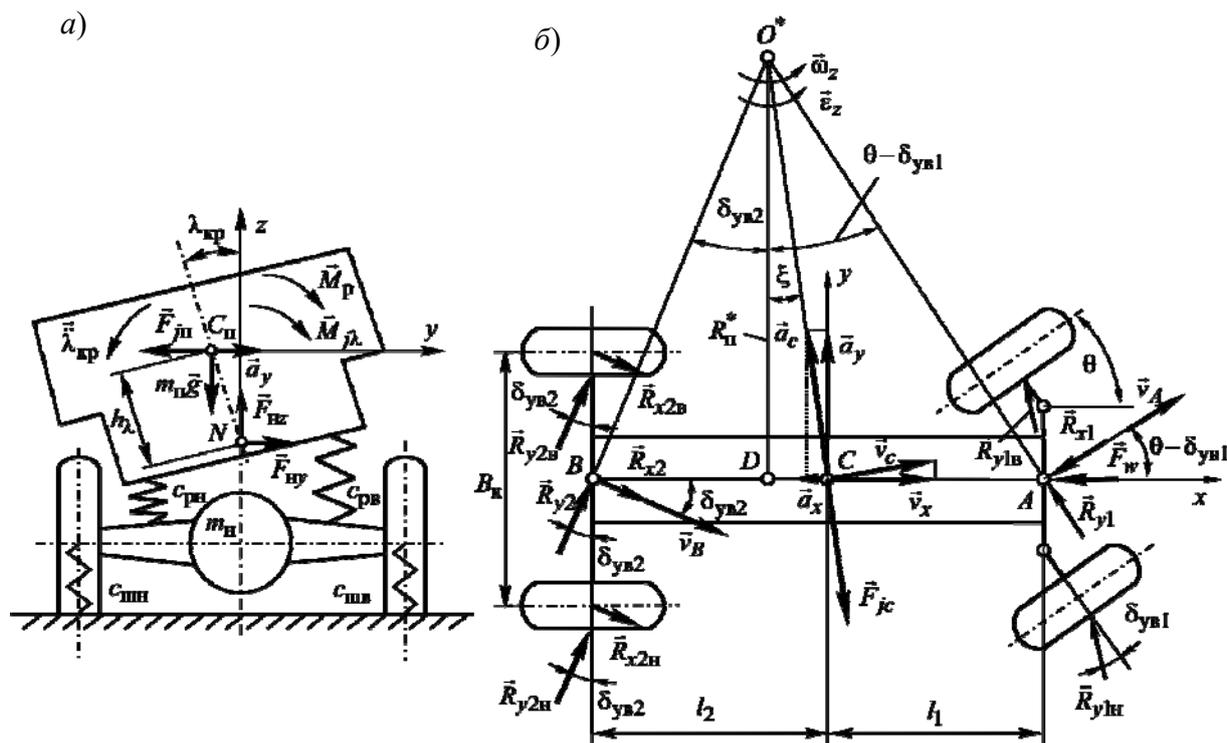


Рис. 1. Динамическая модель для исследования управляемости и устойчивости движения автомобиля при выполнении маневра «переставка»: а – взаимодействие поддрессоренной и поддрессоренной массы; б – взаимодействие с опорной поверхностью дороги

В плоскости дороги (см. рис. 1, б) на колеса автомобиля воздействуют продольные $\bar{R}_{x1в}, \bar{R}_{x1н}, \bar{R}_{x2в}, \bar{R}_{x2н}$ и поперечные (боковые) $\bar{R}_{y1в}, \bar{R}_{y1н}, \bar{R}_{y2в}, \bar{R}_{y2н}$ реакции (индексом «в» обозначены внутренние колеса по отношению к мгновенному центру поворота O^* , а индексом «н» – наружные). Углы поворота обоих управляемых колес при выполнении маневра «переставка» сравнительно невелики (в пределах 4...6 град), поэтому примем их оди-

наковыми: $\theta_в = \theta_н = \theta$. Так как шины обладают упругими свойствами, то под действием силы инерции \bar{F}_{jc} происходит их деформация – продольная и поперечная и возникает боковой увод передних и задних колес $\delta_{ув1}$ и $\delta_{ув2}$.

Предположим, что векторы продольных и поперечных реакций левых и правых колес одинаковы. Суммируем их и приложим соответственно в точках A и B переднего и заднего мостов. В результате вектор скорости \vec{v}_A точки A переднего моста направлен под уг-

лом $(\theta - \delta_{yB1})$ относительно оси Cx , а вектор скорости \vec{v}_B точки B заднего моста – под углом δ_{yB2} .

На основе динамических моделей

$$\left. \begin{aligned} dv_x/dt &= (-R_{x1} \cos(\theta - \delta_{yB1}) + R_{x2} \cos(\delta_{yB2}) - R_{y1} \sin(\theta - \delta_{yB1}) + R_{y2} \sin(\delta_{yB2}) - \\ &\quad - F_{\Psi} - F_w + m_a \omega_z^2 \sin(\zeta) / K_{tr}) / m_a + v_y \omega_z; \\ dv_y/dt &= (-R_{x1} \sin(\theta - \delta_{yB1}) - R_{x2} \sin(\delta_{yB2}) + R_{y1} \cos(\theta - \delta_{yB1}) + R_{y2} \cos(\delta_{yB2}) - \\ &\quad - m_a \omega_z^2 \cos(\zeta) / K_{tr}) / m_a - v_x \omega_z; \\ d\omega_z/dt &= (-R_{x1} l_1 \sin(\theta - \delta_{yB1}) + R_{x2} l_2 \sin(\delta_{yB2}) + R_{y1} l_1 \cos(\theta - \delta_{yB1}) - R_{y2} l_2 \cos(\delta_{yB2})) / J_z; \\ d\omega_{кр}/dt &= (m_{\Pi} h_{\lambda} (\omega_z^2 \cos(\lambda_{кр}) / K_{tr} + g \sin(\lambda_{кр})) - (c_{\lambda 1} + c_{\lambda 2}) \lambda_{кр} - (\mu_{\lambda 1} + \mu_{\lambda 2}) \omega_{кр}) / J_{\Pi \lambda}; \\ d\omega_{Н.М}/dt &= ((c_{\lambda 1} + c_{\lambda 2}) \lambda_{кр} + (\mu_{\lambda 1} + \mu_{\lambda 2}) \omega_{кр} - (c_{Н.М1} + c_{Н.М2}) \lambda_{Н.М}) / J_{Н.М}, \end{aligned} \right\} (3)$$

где m_a – полная масса автомобиля, кг; v_x, v_y – проекции скорости центра масс C на оси координат x и y , м/с; ω_z – угловая скорость вращения автомобиля относительно вертикальной оси z , рад/с; $\omega_{кр}$ – угловая скорость крена поддрессоренной массы, рад/с; $\omega_{Н.М}$ – угловая скорость поворота неподдрессоренной массы в вертикальной поперечной плоскости, рад/с; F_{Ψ} – суммарное дорожное сопротивление, Н; F_w – сила сопротивления воздуха, Н; K_{tr} – кривизна траектории движения центра масс автомобиля, 1/м; ζ – угол отклонения вектора скорости центра масс \vec{v}_C от продольной оси x , рад; J_z – момент инерции полной массы автомобиля относительно вертикальной оси z , кг·м²; $J_{\Pi \lambda}$ – момент инерции поддрессоренной массы m_{Π} относительно оси крена N , кг·м²; $J_{Н.М}$ – момент инерции неподдрессоренной массы $m_{Н}$ относительно продольной оси x , кг·м²; $\mu_{\lambda 1}, \mu_{\lambda 2}$ – коэффициенты сопротивления амортизаторов подвески, Н·с/м; $c_{Н.М1}, c_{Н.М2}$ – коэффициенты угловой

(см. рис. 1, а, б) составим систему дифференциальных уравнений, описывающих процесс движения автомобиля при выполнении маневра «переставка»:

жесткости шин, Н·м.

Значения коэффициентов $c_{Н.М1}$ и $c_{Н.М2}$ вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} c_{Н.М1} &= 0,5 c_{\text{ш1}} B_{к1}^2; \\ c_{Н.М2} &= 0,5 c_{\text{ш2}} B_{к2}^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где $c_{Н.М1}, c_{Н.М2}$ – коэффициенты радиальной жесткости шин, Н/м; $B_{к1}, B_{к2}$ – колеи соответственно передних и задних колес, м.

Момент инерции $J_{\Pi \lambda}$ определяется на основе выражения

$$J_{\Pi \lambda} = J_x + m_{\Pi} h_{\lambda}^2, \quad (5)$$

где J_x – момент инерции поддрессоренной массы относительно продольной оси, проходящей через точку C_{Π} ее центра масс, кг·м²; h_{λ} – плечо крена, м.

Угол ζ отклонения вектора скорости \vec{v}_C относительно оси Cx находится по формуле [3, с. 413]

$$\xi = [l_2(\theta - \delta_{yB1}) - l_1 \delta_{yB2}] / L, \quad (6)$$

где L – база автомобиля.

Поскольку угол ξ небольшой, примем $\vec{v}_x = \vec{v}_c$, а значения v_y и ω_z определим по формулам [3]

$$v_y = v_x \xi = v_x [l_2(\theta - \delta_{yB1}) - l_1 \delta_{yB2}] / L; \quad (7)$$

$$\omega_z = v_x / R_{\Pi}^* = v_x (\theta - \delta_{yB1} + \delta_{yB2}) / L, \quad (8)$$

где R_{Π}^* – радиус поворота автомобиля с учётом увода колёс.

Решив совместно уравнения (7) и (8), получим выражения для вычисления углов увода

$$\delta_{yB1} = \theta - (l_1 \omega_z + v_y) / v_x; \quad (9)$$

$$\delta_{yB2} = (l_2 \omega_z - v_y) / v_x. \quad (10)$$

Формулы (9) и (10) получены из условия, что увод колёс обусловлен лишь боковыми упругими деформациями шин под воздействием силы инерции \vec{F}_{jc} , а величина деформации пропорциональна боковым силам \vec{F}_{y1} и \vec{F}_{y2} , которые уравниваются боковыми реакциями \vec{R}_{y1} и \vec{R}_{y2} . В результате

$$R_{y1} = k_{yB1} \delta_{yB1}; \quad (11)$$

$$R_{y2} = k_{yB2} \delta_{yB2}, \quad (12)$$

где k_{yB1} , k_{yB2} – коэффициенты сопротивления уводу, Н/рад.

Но с увеличением боковых сил \vec{F}_{y1} и \vec{F}_{y2} колёса начинают проскальзывать относительно опорной поверхности и может произойти занос мостов. Для оценки величины бокового скольжения колёс λ_s использовано выраже-

ние в виде квадратичного полинома

$$\lambda_s = b_0 + b_1 \Delta F_y + b_2 \Delta F_y^2, \quad (13)$$

где b_0, b_1, b_2 – коэффициенты; ΔF_y – аргумент полинома.

Были использованы следующие значения коэффициентов: $b_0 = 1,6 \cdot 10^{-3}$; $b_1 = 2,457 \cdot 10^{-6}$; $b_2 = 8,802 \cdot 10^{-10}$.

Аргумент полинома (13) учитывает ограничение боковых реакций по сцеплению с дорогой. Его изменение в процессе движения определялось по формуле

$$\Delta F_y = R_y - k_{\phi} R_{z.st} \phi_x, \quad (14)$$

где $R_{z.st}$ – статическая нагрузка на колёса соответствующего моста, Н; ϕ_x – коэффициент сцепления; k_{ϕ} – некоторый коэффициент, значение которого подбирается в процессе проведения исследований.

Используются лишь положительные значения ΔF_y . Единица измерения скольжения λ_s такая же, как и увода колёса δ_{yB} (рад). Боковое скольжение колёс увеличивает их увод, т. к. в этом случае угол увода обусловлен одновременно и боковой упругой деформацией шин, и их боковым скольжением.

В качестве объекта моделирования принят автомобиль МАЗ-5337 (категория N_3). Информация о параметрах этого автомобиля использована из [6]: полная масса $m_a = 15000$ кг; подрессоренная масса $m_{\Pi} = 14000$ кг; неподрессоренные массы $m_{H1} = 300$ кг, $m_{H2} = 700$ кг; моменты инерции $J_x = 13550$ кг·м², $J_y = J_z = 95000$ кг·м²; база автомобиля $L = 4,75$ м; координаты центра масс $l_1 = 3,1$ м, $l_2 = 1,65$ м, $h_c = 1,4$ м; плечо крена $h_{кр} = 0,7$ м; колеи $B_{K1} = 2,05$ м,

$B_{к2} = 1,8$ м; рессорные базы $B_{р1} = 1,8$ м, $B_{р2} = 1,7$ м; коэффициенты жёсткостей подвесок $c_{р1} = 150$ кН/м, $c_{р2} = 350$ кН/м; коэффициент радиальной жесткости шины $c_z = 750$ кН/м; коэффициенты сопротивления уводу мостов

$k_{уВ1} = 150$ кН/рад, $k_{уВ2} = 260$ кН/рад; статический радиус колёс $r_{ст} = 0,505$ м; коэффициент сцепления $\varphi_x = 0,75$.

Алгоритм управления поворотом колёс автомобиля определялся выражением

$$\omega_{\theta} = \begin{cases} \omega_{\theta} = 0 & \text{при } x \leq 2; \\ \omega_{\theta} = \omega_{\theta n} & \text{при } 2 < x \leq 7; \\ \omega_{\theta} = -\omega_{\theta n} & \text{при } 7 < x \leq 17; \\ \omega_{\theta} = \omega_{\theta n} & \text{при } 17 < x \leq 22; \\ \omega_{\theta} = \omega_{\theta n} / k_v & \text{при } 22 < x \leq 25; \\ \omega_{\theta} = -\omega_{\theta n} / k_v & \text{при } 25 < x \leq 28; \\ \omega_{\theta} = 0 & \text{при } x > 28, \end{cases} \quad (15)$$

где ω_{θ} – угловая скорость поворота управляемых колёс, рад/с; $\omega_{\theta n}$ – базисное значение угловой скорости поворота, определяемое скоростью движения автомобиля при совершении маневра «переставка»; x – продольное перемещение автомобиля на дороге, м; k_v – коэффициент, зависящий от скорости движения автомобиля.

При скорости $v = 40$ км/ч принимали $\omega_{\theta n} = 15$ рад/с, $k_v = 3,5$; при $v = 60$ км/ч $\omega_{\theta n} = 30$ рад/с, $k_v = 5,5$; при $v = 80$ км/ч $\omega_{\theta n} = 40$ рад/с, $k_v = 7,5$.

На рис. 2, а приведен график управления угловой скоростью поворота колёс $\omega_{\theta} = f(t)$, а на рис. 2, б – изменения угла поворота колёс $\theta = f(t)$ при движении автомобиля со скоростью $v = 60$ км/ч.

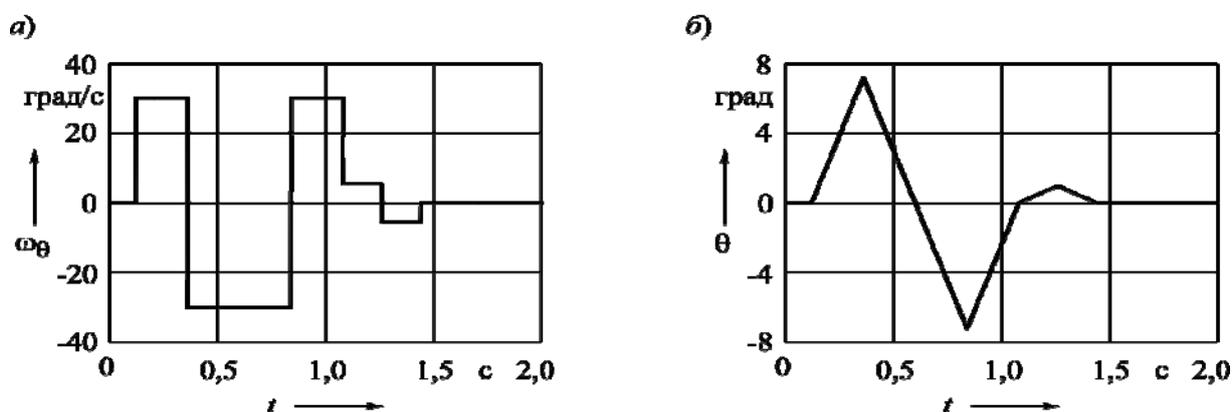


Рис. 2. Изменение скорости и угла поворота колёс при выполнении автомобилем маневра «переставка» со скоростью 60 км/ч

На рис. 3, *a* представлены графики изменения во времени t координаты поперечного перемещения автомобиля y_c и курсового угла γ , а на рис. 3, *б* – в зависимости от продольного перемещения x_c . Маневр «переставка» фактически выполнен за 2 с на пути перемещения 30 м.

На рис. 4, *a* показан график изменения угловой скорости поворота автомобиля $\omega_z = f(t)$, на рис. 4, *б* – кривизны траектории движения $K_{tr} = f(t)$,

а на рис. 4, *в* – бокового ускорения $a_y = f(t)$ при движении со скоростью 60 км/ч. Очевидна синхронность протекания этих характеристик. Пиковые выбросы характеристик K_{tr} и a_y обусловлены кратковременным проскальзыванием передних колес в боковом направлении в момент времени $t = 0,4$ с. Графики проскальзывания колес представлены на рис. 6, *г–е*.

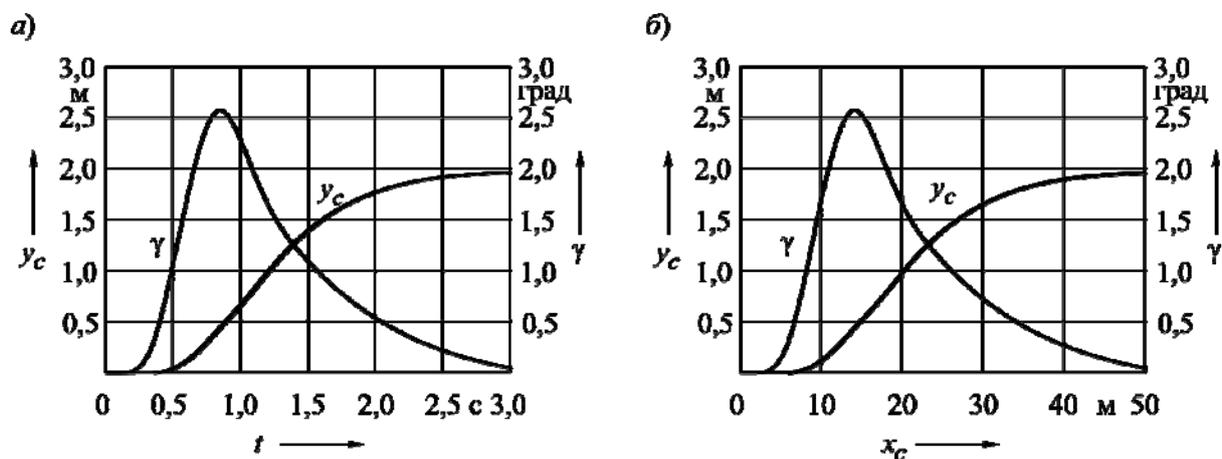


Рис. 3. Изменение координаты поперечного перемещения y_c и курсового угла γ во времени t (*a*) и от продольного перемещения x_c (*б*) при выполнении автомобилем маневра «переставка» со скоростью 60 км/ч

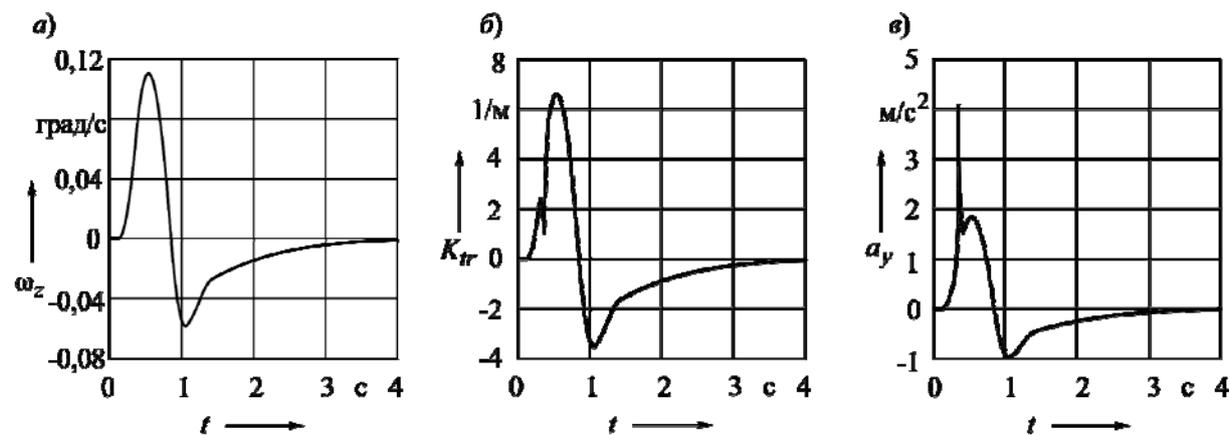


Рис. 4. Изменение угловой скорости поворота (*a*), кривизны траектории (*б*) и бокового ускорения (*в*) автомобиля

Рассмотрим основные параметры и характеристики процесса движения, полученные при выполнении исследуемого маневра.

На рис. 5 приведены графики изменения боковых реакций дороги R_{y1}

и R_{y2} на передние и задние колеса автомобиля при движении со скоростями 40 (а), 60 (б) и 80 (в) км/ч, а на рис. 6, а–в – соответствующие им графики углов увода колес $\delta_{ув1}$ и $\delta_{ув2}$.

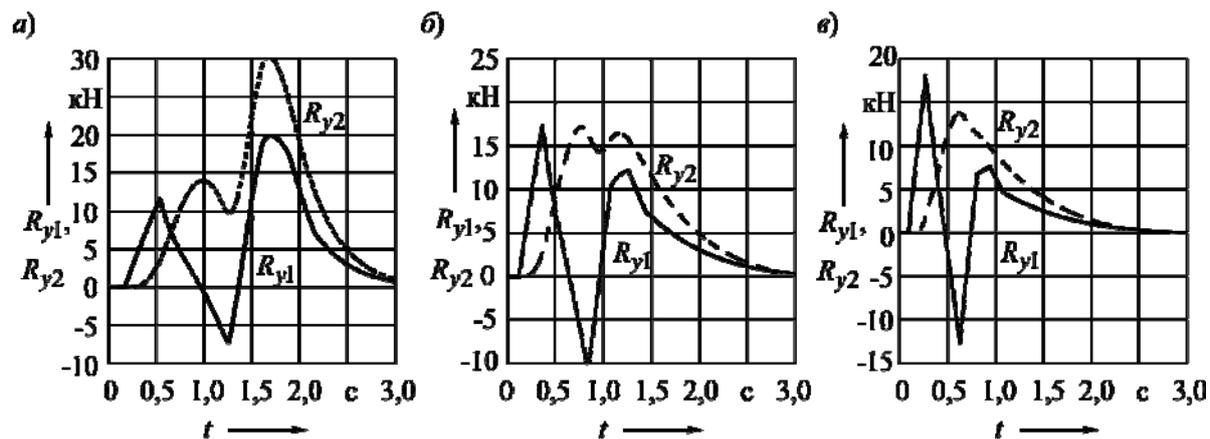


Рис. 5. Изменения боковых реакций дороги при движении со скоростями 40 (а), 60 (б) и 80 (в) км/ч

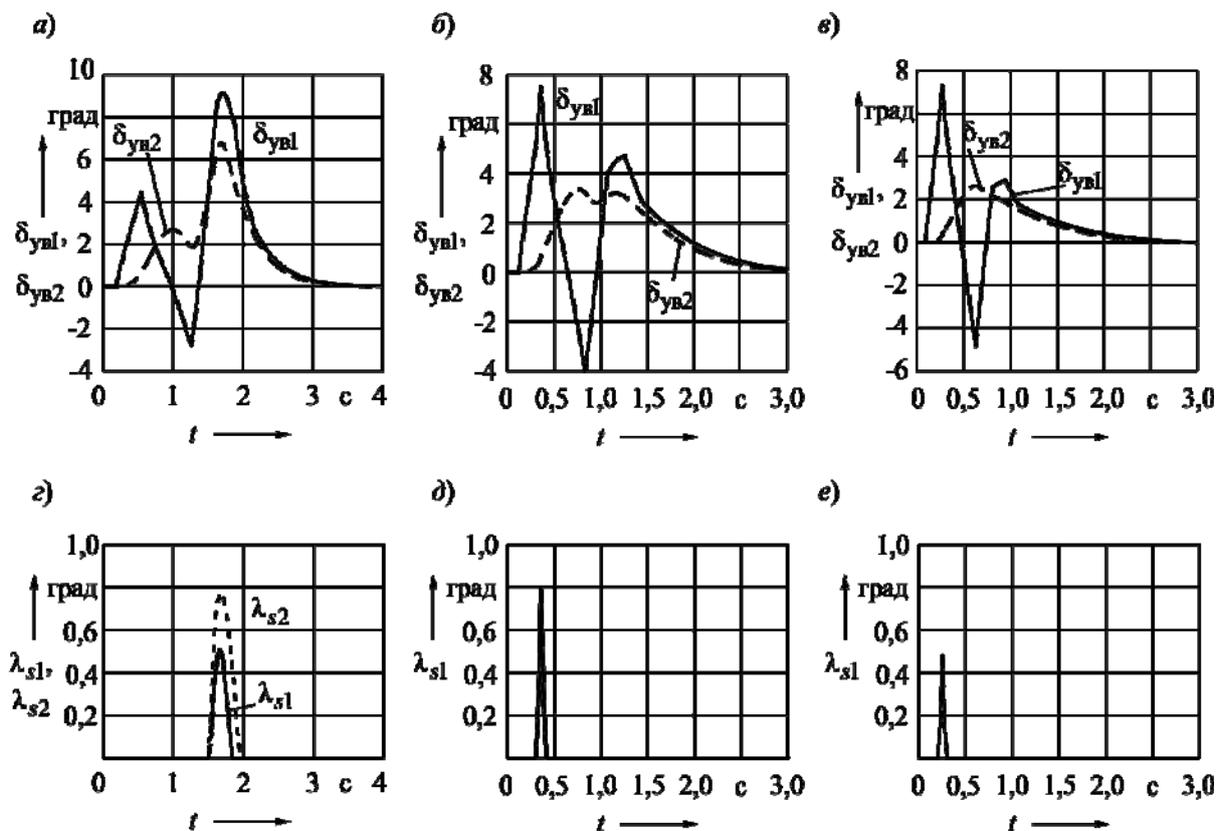


Рис. 6. Изменения углов увода колес при движении со скоростями 40 (а), 60 (б) и 80 (в) км/ч и боковых скольжений колес при этих условиях (г–е)

С увеличением скорости значения R_{y1} , R_{y2} , $\delta_{yв1}$ и $\delta_{yв2}$ существенно возрастают, особенно передних колес. На их величину заметное влияние оказывает проскальзывание колес относительно дороги. Графики скольжения λ_{s1} и λ_{s2} изображены на рис. 6, *з–е*. Очевидно, что при возникновении скольжения боковые реакции и увод резко возрастают.

При совершении маневра «переставка» под действием боковой силы инерции $F_{jп}$ возникает крен кузова и изменяются нормальные реакции колес – нагрузка на наружные колеса (по отношению к центру поворота O^*) возрастает, а на внутренние, соответственно, снижается. Перераспределение нормальных реакций определяется величиной скорости автомобиля v_a и кривизной траектории движения K_{tr}

($K_{tr} = 1/R_{п}^*$). В свою очередь, K_{tr} и $F_{jп}$ зависят от скорости поворота колес ω_{θ} и максимальных углов их поворота θ_{max} . В результате при соответствующем их сочетании может произойти отрыв внутренних колес от дороги и опрокидывание автомобиля.

На рис. 7, *а–в* представлены графики изменения во времени угла крена кузова $\gamma_{кр} = f(t)$ и скорости его боковых наклонов $\omega_{кр} = f(t)$. Согласно этим графикам наибольший крен при высокой скорости движения происходит при выезде на левую полосу в период времени 0,5...0,8 с, а при меньшей скорости (40...60 км/ч) – на этапе выравнивания траектории на новой полосе движения при $t \approx 1,5...2$ с.

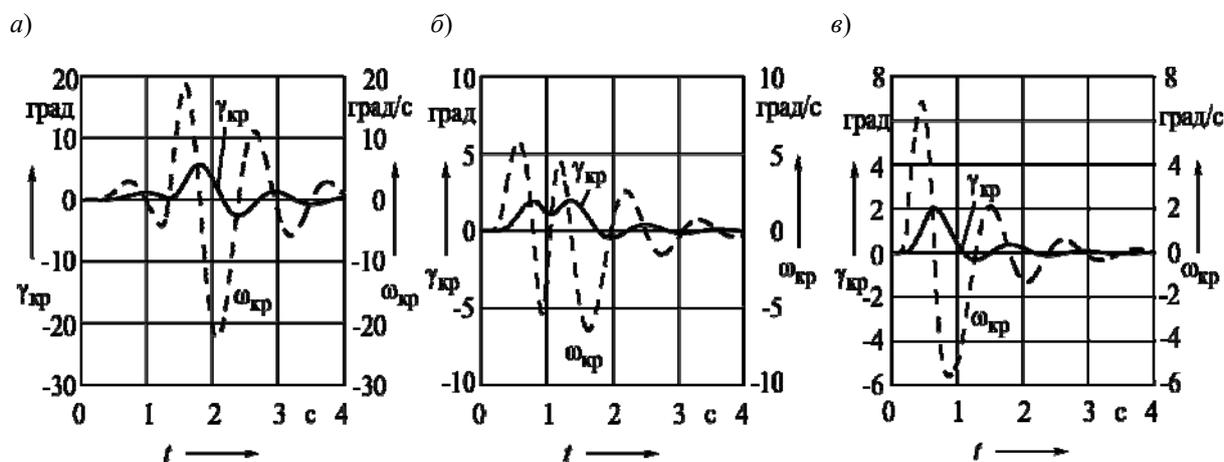


Рис. 7. Изменение во времени крена кузова и скорости его боковых наклонов при скоростях автомобиля 40 (*а*), 60 (*б*) и 80 (*в*) км/ч

Аналогично изменяется крен мостов автомобиля, как видно из рис. 8, *а–в*. Однако величина крена мостов незначительна и не превышает 0,5 град, в то время как крен кузова может превышать 6 град (см. рис. 7, *а*).

На рис. 9, *а–в* представлены гра-

фики изменения во времени нормальных реакций внутренних и наружных по отношению к центру поворота O^* колес переднего $R_{z1в}$, $R_{z1н}$ и заднего $R_{z2в}$, $R_{z2н}$ мостов.

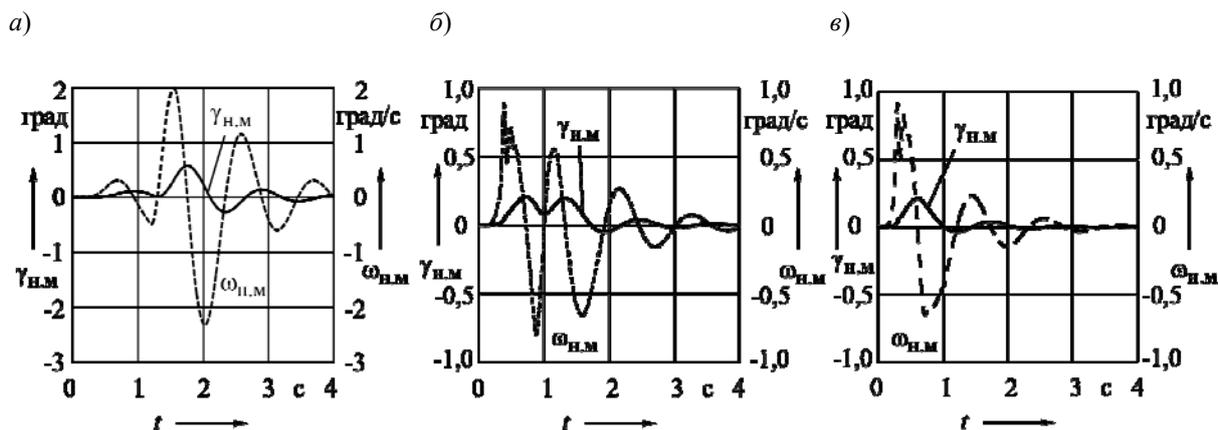


Рис. 8. Изменение во времени крена мостов и скорости их боковых наклонов при скоростях автомобиля 40 (а), 60 (б) и 80 (в) км/ч

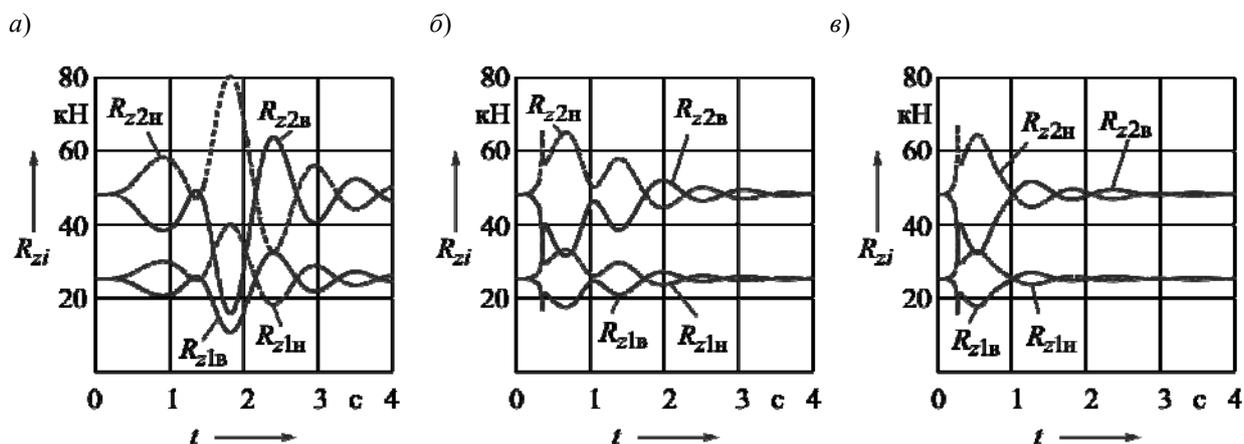


Рис. 9. Графики изменения во времени нормальных реакций внутренних и наружных колес при скоростях автомобиля 40 (а), 60 (б) и 80 (в) км/ч

Графики нормальных реакций имеют сложный неоднозначный характер. Значения нормальных реакций изменяются в очень широких пределах. Характер их изменения непосредственно связан с величиной крена кузова (см. рис. 7) и с фазами совершения исследуемого маневра. Угол крена $\gamma_{кр}$ зависит от коэффициентов жесткости рессор подвески c_{p1} , c_{p2} и плеча крена $h_{кр}$.

Смена полосы движения на коротком интервале пути при более высокой скорости движения, чем принималась в представленных результатах моделиро-

вания, и большей скорости поворота управляемых колес непременно приводит к отрыву колес от дороги, боковому скольжению колес и заканчивается нарушением процесса интегрирования системы уравнений (3) математической модели.

Рассмотренная методика исследования процесса выполнения маневра «переставка» позволяет выявить параметры, оказывающие существенное влияние на управляемость и устойчивость движения автомобиля, и подобрать наилучшее сочетание их проектных значений.

Заключение

1. Разработаны математическая модель и методика исследования процесса движения автомобиля при выполнении манёвра «переставка», предназначенные для определения параметров и характеристик управляемого и устойчивого движения при заданных параметрах криволинейной траектории и управления.

2. Приведены результаты моделирования движения грузового автомоби-

ля категории N_3 при выполнении манёвра, рассмотрено влияние управляющих воздействий и скорости движения на параметры и характеристики функционирования механизмов автомобиля.

3. Предлагаемая модель предназначена для использования на начальной стадии проектирования автомобиля при определении параметров, обеспечивающих выполнение технических требований на показатели управляемости и устойчивости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смирнов, Г. А.** Теория движения колёсных машин: учебник для вузов / Г. А. Смирнов. – Москва: Машиностроение, 1990. – 352 с.
2. **Ларин, В. В.** Теория движения полноприводных колёсных машин : учебник для вузов / В. В. Ларин. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 391 с.
3. **Тарасик, В. П.** Теория движения автомобиля: учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2022. – 576 с.
4. **ГОСТ 31507–2012.** Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. – Москва, 2012. – 42 с.
5. **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование технических систем : учебник / В. П. Тарасик. – Минск: Новое знание; Москва: ИНФРА-М, 2017. – 592 с.
6. **Молибошко, Л. А.** Компьютерные модели автомобилей : учебник / Л. А. Молибошко. – Минск: Новое знание; Москва: ИНФРА-М, 2012. – 295 с.

Статья сдана в редакцию 10 февраля 2022 года

Владимир Петрович Тарасик, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

Ольга Владимировна Пузанова, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-29-634-57-04.

Vladimir Petrovich Tarasik, DSc (Engineering), Prof., Belarussian-Russian University. Tel.: +375-222-25-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

Olga Vladimirovna Puzanova, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarussian-Russian University. Tel.: +375-296-34-57-04.

DOI: 10.53078/20778481_2022_1_87

УДК 621.791.754

Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ С МОДИФИКАЦИЕЙ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ ГАЛОИДНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

К. А. Fiatsisava, A. O. Karatseyeu, A. A. Karatseyeva

METALLURGICAL PROCESSES DURING ARC WELDING IN THE PROTECTIVE GAS ATMOSPHERE MODIFIED BY HALOIDE COMPOUNDS

Аннотация

Определены зависимости содержания серы и углерода в наплавленном металле, а также частоты коротких замыканий дугового промежутка от концентрации вводимого в защитную газовую атмосферу SF₆ при различных значениях параметров режима. На основании проведенного химического анализа наплавленного металла и результатов осциллографирования выдвинуты предположения о ключевых механизмах протекания металлургических процессов в условиях модификации защитной газовой атмосферы галоидными соединениями на основе F и области эффективного применения технологии дуговой сварки с использованием такой модификации.

Ключевые слова:

дуговая сварка в защитных газах, защитные газовые смеси, гексафторид серы, напряжение на дуге, частота переноса электродного металла, модификация защитной газовой атмосферы.

Для цитирования:

Фетисова, Е. А. Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, А. А. Коротеева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 87–96.

Abstract

The relationships between the sulfur and carbon content in deposited metal, as well as the frequency of short circuits of the arc gap, and the concentration of SF₆ introduced into protective gas atmosphere at various magnitudes of welding parameters were determined. Based on the chemical analysis of the deposited metal and the results of performed oscillographic testing, assumptions were made concerning the key mechanisms of metallurgical processes occurring under modification of the protective gas atmosphere with F-based halogen compounds, and the areas, in which the arc welding technology with such modifications can be effectively applied.

Keywords:

shielded arc welding, shielding gas mixtures, sulfur hexafluoride, arc voltage, electrode metal transfer frequency, modification of shielding gas atmosphere.

For citation:

Fiatsisava, K. A. Metallurgical processes during arc welding in the protective gas atmosphere modified by haloide compounds / K. A. Fiatsisava, A. O. Karatseyeu, A. A. Karatseyeva // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 87–96.

Дуговая сварка в среде защитных газов благодаря своей высокой произ-

водительности и простоте механизации в промышленных условиях традицион-

но является основным способом получения неразъемных соединений при изготовлении конструкций и изделий из металлов и сплавов. Совершенствование технологических процессов сварки на протяжении последнего времени главным образом было связано с разработкой новых способов эффективного управления переносом электродного металла путем программного задания характера изменения электрических параметров источника питания. Сварочные технологии при этом почти полностью зависели от возможностей оборудования и определялись исключительно как новые электротехнические решения. Вместе с тем, появление новых материалов, обладающих уникальными свойствами и имеющих комплекс характеристик, формируемых в сложных условиях термомеханического воздействия в процессе металлургического производства, требует разработки новых решений и подходов, не ограничивающихся вопросами цифрового управления оборудованием. Важный аспект в таких условиях – учет металлургических особенностей протекания сварочных процессов и возможностей управления и контроля микроструктуры материалов.

Одним из наиболее перспективных направлений при изготовлении тяжело нагруженных элементов сварных конструкций является переход на использование высокопрочных микролегированных сталей с контролируемой термомеханической прокаткой. Стали относятся к хорошо и удовлетворительно свариваемым, однако, как и большинство высокопрочных материалов, обладают повышенной чувствительностью к содержанию водорода в защитной атмосфере и наплавленном металле шва. Характерный дефект при этом – появление трещин, инициированных диффузионной подвижностью водорода в металле по механизму замедленного разрушения.

Одним из способов снижения чувствительности металла к водороду явля-

ется ограничение растворимости Н в металле шва и околошовной зоне путем связывания в нерастворимые стабильные химические соединения. В сварочной практике такие решения известны и находят практическое применение в электродных покрытиях, флюсах и порошковых проволоках, построенных на фтористо-кальциевой основе. Однако в наиболее распространенном способе дуговой сварки в защитных газах, где используется проволока сплошного сечения, введение такого рода компонентов затруднительно. Использование для таких целей флюсовых материалов в твердой фазе, наносимых на проволоку, вызывает ряд технических сложностей, поэтому практического применения такой способ не нашел.

Эффективным является использование термодинамически стабильных соединений фтора в газообразном виде, контролируемо вводимых в защитную атмосферу [1]. Чрезвычайно важный момент для практического применения предлагаемой технологии при этом – наличие таких компонентов в свободном доступе и их нетоксичность в условиях использования.

Наиболее известный и доступный для таких целей гексафторид серы, называемый по-другому «элегаз» в силу его распространения в качестве газообразного наполнителя предохранительных электрических выключателей. Газ обладает высоким потенциалом ионизации, что препятствует возникновению и стабильному состоянию электрических дуг между контактами в момент их размыкания.

Таким образом, наиболее важными свойствами с точки зрения применения гексафторида серы в составе защитной газовой смеси являются:

- нетоксичность в нормальных условиях благодаря высокой стабильности соединения SF₆;
- диссоциация при высоких температурах с образованием свободных соединений фтора, способных вступать

в реакцию с водородом с образованием нерастворимых в жидком металле сварочной ванны соединений HF;

– сжатие дуги из-за высокого эффективного потенциала ионизации.

Функциональная модификация защитной газовой атмосферы является эффективным способом воздействия на

перенос электродного металла и интенсификации физико-металлургических процессов при сварке. Ранее было показано, что введение SF_6 в защитную атмосферу позволяет качественно снизить количество диффузионного водорода (рис. 1) [2].

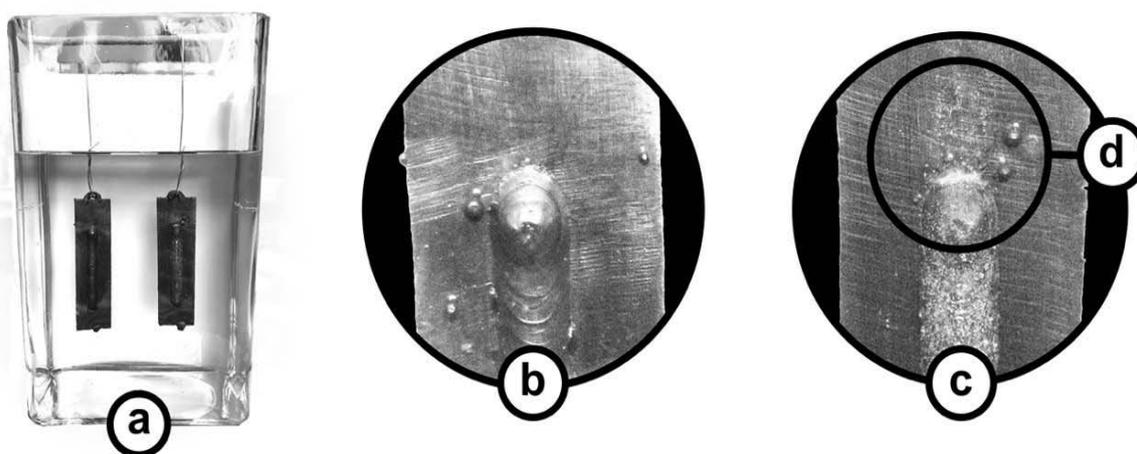


Рис. 1. Качественная оценка насыщаемости водородом образца наплавки при помощи глицериновой пробы: а – колба с образцами; б – образец, наплавленный с введением в защитную атмосферу SF_6 ; с – образец, наплавленный по традиционной технологии (в среде $Ar + CO_2$); d – выделившийся водород в виде сплошного потока всплывающих с поверхности наплавки пузырей

Однако наличие серы, традиционно рассматриваемой в качестве вредной примеси в сталях и сплавах, вызывает ряд ограничений по применению технологии и требует дополнительных исследований. Кроме того, очевидно, что переход серы в расплавленный металл будет определяться особенностями горения дуги в условиях повышения эффективного потенциала ионизации, вызванного наличием в ней фтора и пространственным сжатием дуги, а также изменившимися закономерностями влияния на эти процессы параметров режима сварки (наплавки). Этим вопросам посвящены исследования, результаты которых приведены в статье. Сущность проводимых исследований заключалась в установлении закономерностей влияния количества вводимого SF_6 в защит-

ную газовую смесь $Ar + CO_2$ и напряжения на дуге на частоту переноса электродного металла и содержание серы в наплавленном металле.

Наплавка образцов выполнялась сварочной проволокой Св-08Г2С на пластины из стали 09Г2С в шесть слоев с силой сварочного тока 130 А и при напряжениях на дуге 14, 16 и 18 В, а также с силой сварочного тока 200 А и при напряжениях на дуге 17, 20 и 22 В (рис. 2). В защитную газовую смесь (82 % $Ar + 18$ % CO_2) вводили SF_6 в количестве от 1 % до 5 %. В процессе наплавки регистрировались действующие значения силы тока и напряжения.

Для обеспечения требуемого состава защитной газовой смеси использовалась схема последовательного смешивания, представленная на рис. 3.

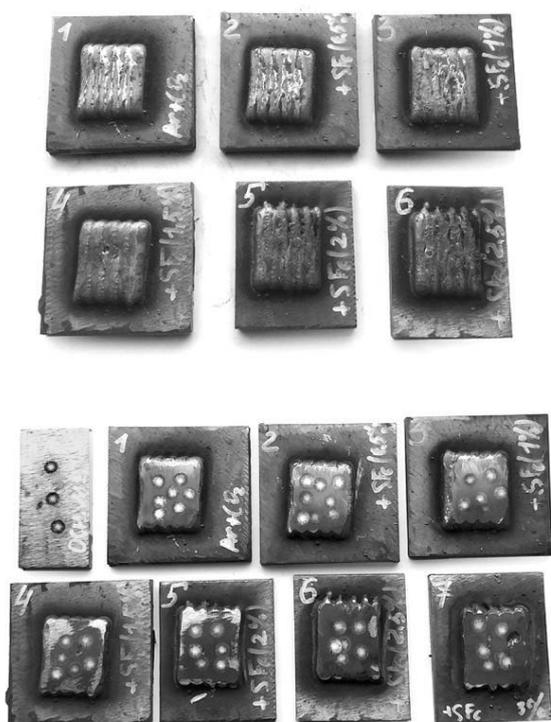


Рис. 2. Внешний вид наплавки до и после измерения химического состава спектральным оптико-эмиссионным способом

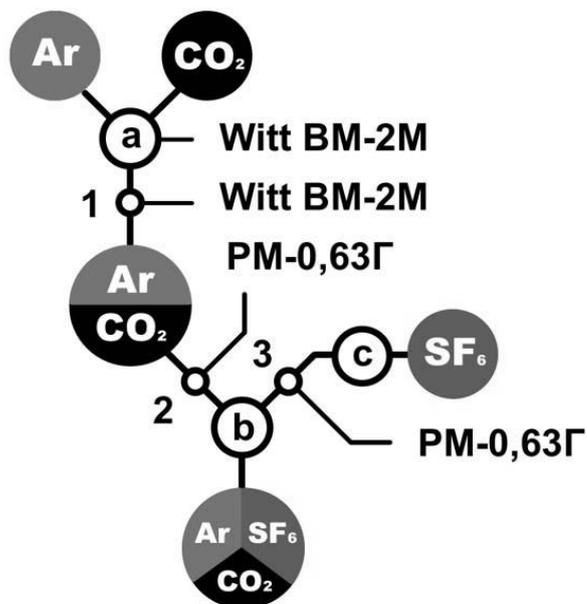


Рис. 3. Принципиальная схема смешивания компонентов защитной газовой смеси: а – смеситель газовый однопостовой Witt BM-2M; б – смеситель инжекторный; с – редуктор газовый; 1 – регулятор расхода газовой смеси в смесителе Witt BM-2M; 2 – ротаметр газовый поплавковый РМ-1,6Г; 3 – ротаметр газовый поплавковый РС-3А

Принцип смешивания заключался в следующем: вначале при помощи смесителя Witt VM-2M (а) получалась газовая смесь $\text{Ar} + \text{CO}_2$ в соотношении 82 %...18 %. При этом смешивание газов происходило при высоком давлении в силу особенностей подключения смесителя к баллонам. После этого расход полученной смеси регулировался при помощи смесителя Witt VM-2M (1) и контролировался с помощью поплавкового ротаметра РМ-1,6Г ГОСТ 13045–81 (2). Баллон с гексафторидом серы SF_6 через редуктор (с) и поплавковый ротаметр РС-3А ГОСТ 13045–81 (3) подключался к смесителю (b) совместно со смесью $\text{Ar} + \text{CO}_2$. Для более точного контроля расхода SF_6 поплавков в ротаметре РС-3А (3) был изготовлен из фторопласта, что потребовало его дополнительной тарировки. Защитная газовая смесь $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$ в необходимой пропорции смешивания компонентов получалась при помощи механического инжекторного смешивания (b). Так как расход $\text{Ar} + \text{CO}_2$ существенно выше, то этот газ подавался через инжектор по центральной магистрали и при помощи регулировки расходов в него вводилось необходимое количество гексафторида серы SF_6 . Общий расход готовой смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$ при проведении экспериментов составлял 15 л/мин.

После выполнения серии наплавов образцы подвергались обработке и подготовке для проведения спектрального оптико-эмиссионного анализа на установке Solaris GNR SCP. Подготовка заключалась во фрезеровке и шлифовке поверхности до необходимого уровня шероховатости поверхности и обезжиривании (см. рис. 2). По результатам анализа построены графические зависимости содержания S и C в наплавленном металле от значений напряжения на дуге и количества гексафторида серы SF_6 , вводимого в защитную атмосферу (рис. 4 и 5). Вместе с графиками представлены микрометаллографические шлифы поверхностей наплавов.

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением количества SF_6 в защитном газе содержание серы в наплавленном металле повышается [3]. Наиболее активный рост наблюдается при введении SF_6 в количестве более 1 %. Соотношение Ar и CO_2 при этом сохраняется в пропорции 82 %...18 % при общем расходе 15 л/мин.

На построенных графических зависимостях наблюдается интенсивное снижение содержания углерода в наплавленном металле при введении гексафторида серы в количестве 1 %...5 %, что объясняется интенсификацией процессов взаимодействия жидкого металла с галогенидной добавкой при увеличении напряжения на дуге. Наиболее вероятным фактором, влияющим на снижение количества C, является химическая реакция его взаимодействия с ионами фтора, адсорбированными поверхностью расплавленной капли электродного металла с образованием продуктов CF_4 и последующим их выгоранием.

Важное значение имеет напряжение на дуге U_d . Полученные результаты показали, что по мере увеличения количества гексафторида серы SF_6 в составе защитной атмосферы напряжение начинает оказывать все большее влияние на рассматриваемые процессы. Так, например, при содержании около 4 % SF_6 (остальное $\text{Ar} + \text{CO}_2$) изменение напряжения на 4...5 В (с 14 до 18 В для силы тока 130 А и с 17 до 22 В для силы тока 200 А) позволяет изменить количество серы в наплавленном металле более чем в 2 раза (с 0,05 % до 0,12 % при силе тока 130 А и с 0,075 % до 0,15 % при силе тока 200 А). Основной причиной такого характера зависимостей является время существования дугового промежутка t_d между отдельными короткими замыканиями при переносе электродного металла в сварочную ванну. Капля расплавленного металла на торце плавящейся присадочной проволоки интенсивно взаимодействует с омывающим её потоком защитной га-

зовой смеси и, будучи сильно перегретой, активно адсорбирует на поверхности и растворяет в себе продукты диссоциации компонентов газовой атмосферы (CO_2 и SF_6). Влияние напряжения на дуге на время её существования и длительность цикла переноса капли расплавленного металла в сварочную ванну

(время между последующими короткими замыканиями) в условиях введения в защитную газовую смесь $\text{Ar} + \text{CO}_2$ гексафторида серы является важным вопросом, для решения которого был проведен ряд экспериментальных исследований, результаты которых представлены на рис. 6 [4].

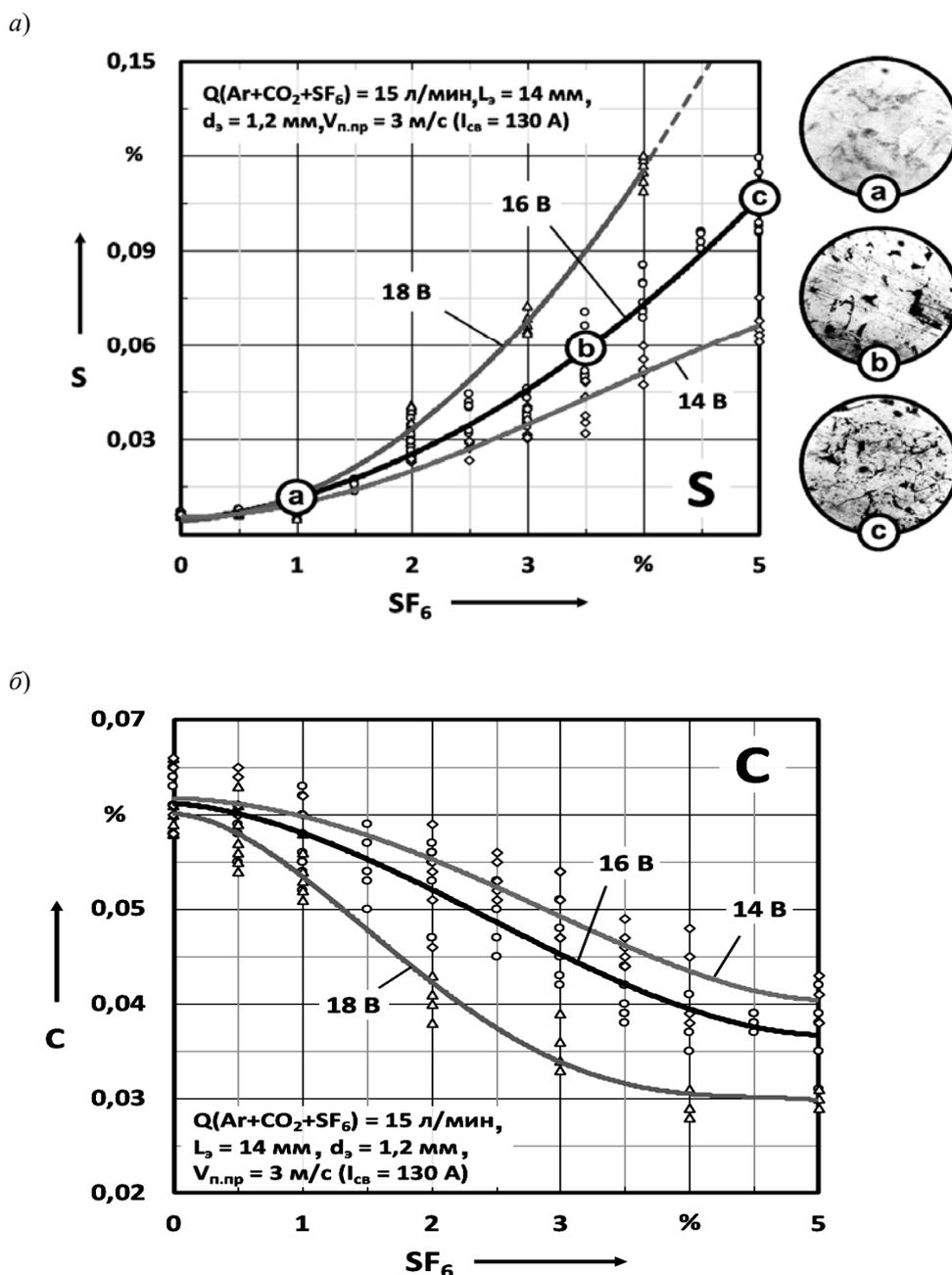


Рис. 4. Содержание S (а) и C (б) в наплавленном металле в зависимости от количества вводимого в защитную атмосферу SF_6 при наплавке с разными значениями напряжения на дуге (сила тока $I_{\text{св}} = 130 \text{ А}$): Q – расход защитной газовой смеси; L_3 – вылет электродной проволоки; $V_{\text{п.пр}}$ – скорость подачи сварочной проволоки; $I_{\text{св}}$ – значение силы сварочного тока

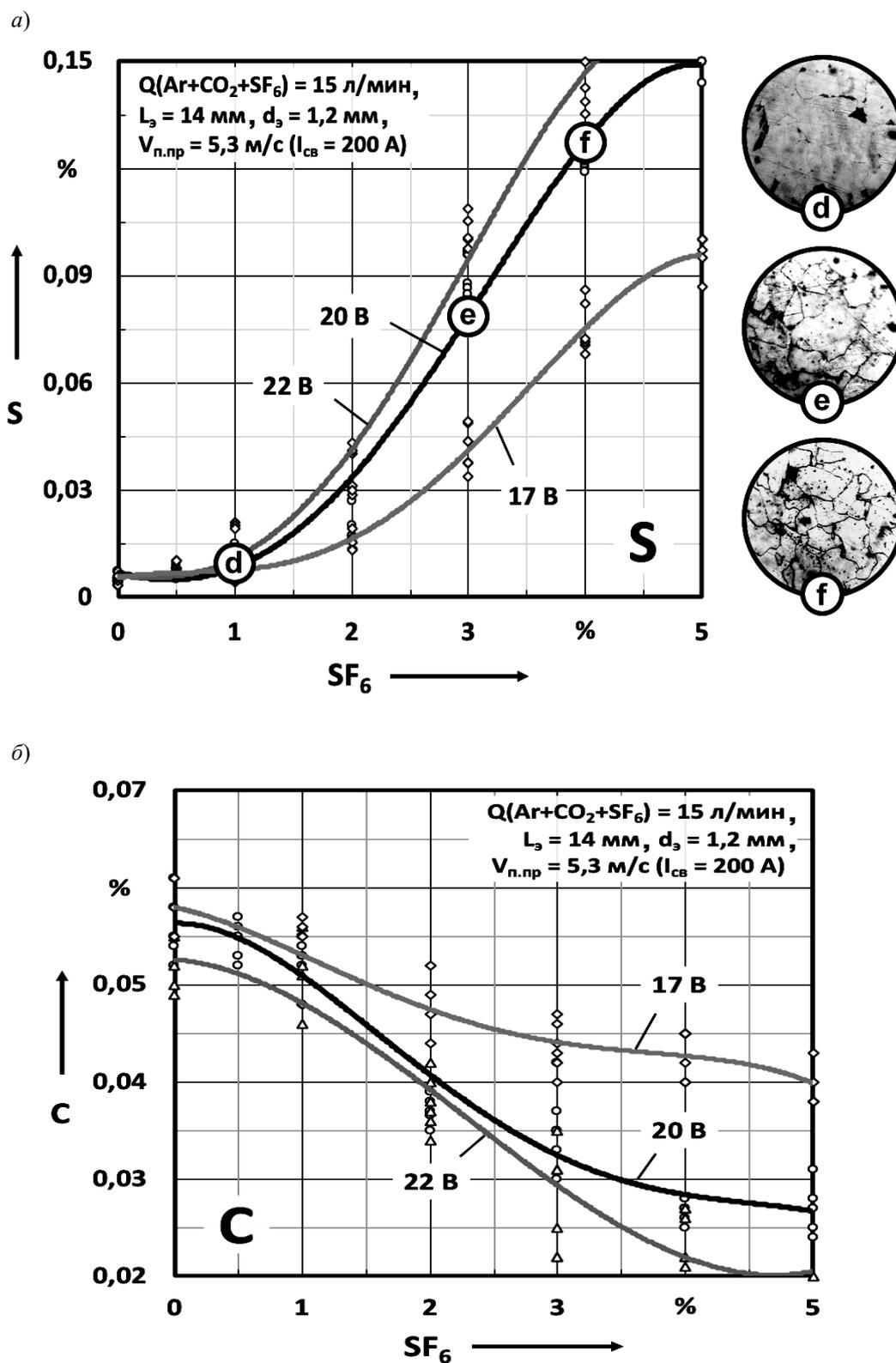
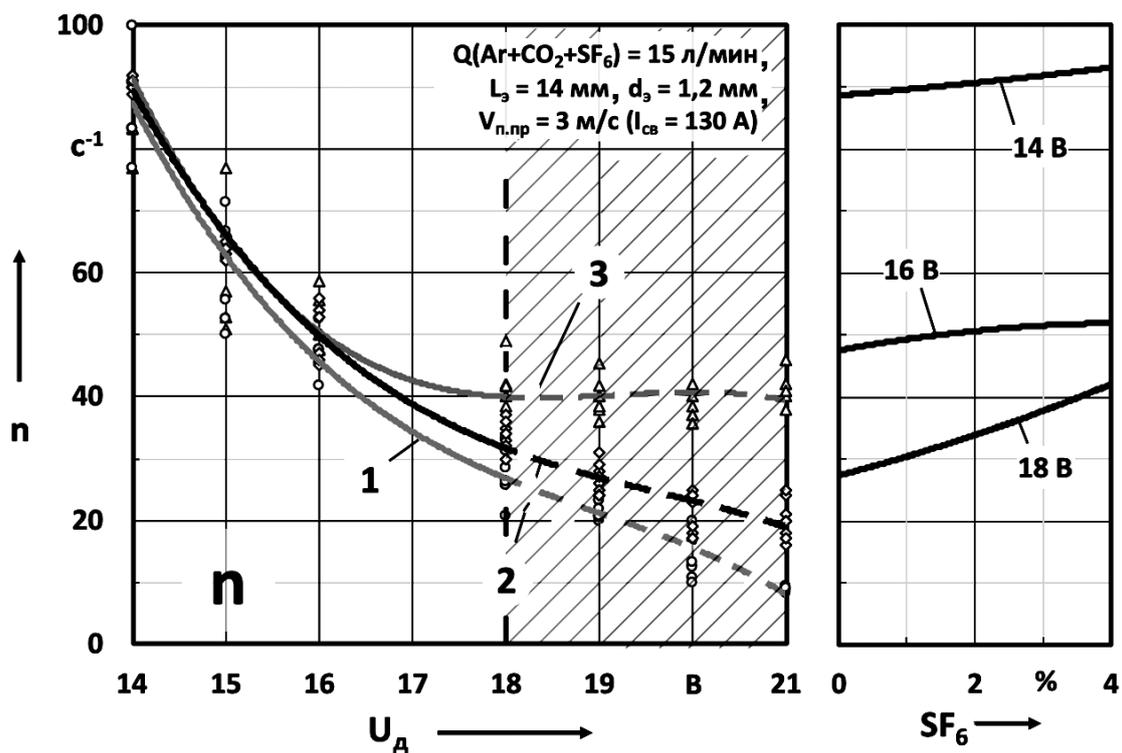


Рис. 5. Содержание S (а) и С (б) в наплавленном металле в зависимости от количества вводимого в защитную атмосферу SF₆ при наплавке с разными значениями напряжения на дуге (сила тока I_{св} = 200 А): Q – расход защитной газовой смеси; L_э – вылет электродной проволоки; V_{п.пр.} – скорость подачи сварочной проволоки; I_{св} – значение силы сварочного тока

a)



б)

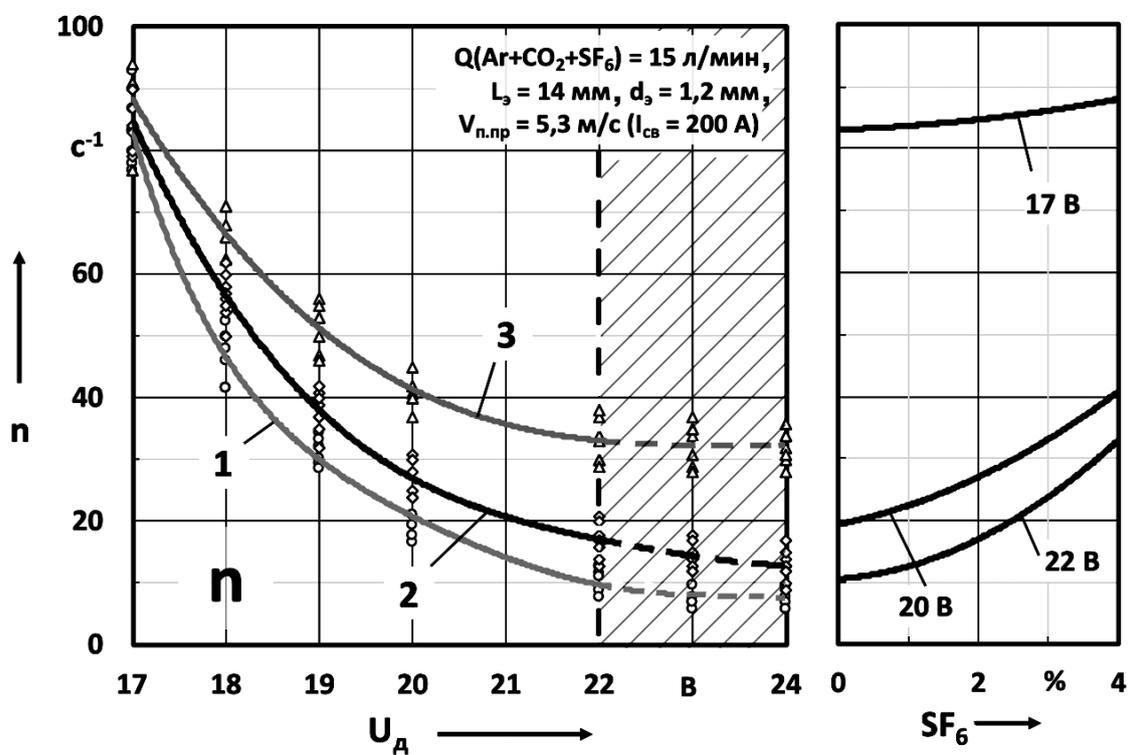


Рис. 6. Зависимость частоты коротких замыканий дугового промежутка (n) от концентрации SF_6 при различном напряжении на дуге U_d и значениях силы тока $I_{св} = 130$ А и $I_{св} = 200$ А соответственно: 1 – сварка в среде 82 % Ar + 18 % CO_2 ; 2 – сварка с введением 2 % SF_6 ; 3 – сварка с введением 4 % SF_6

Эксперименты проводились с использованием метода скоростной съемки с одновременным осциллографированием процесса сварки. На рис. 6 представлены графические зависимости частоты коротких замыканий при изменении напряжения на дуге и введении в защитную газовую атмосферу различного количества SF₆.

Для подтверждения выдвинутых предположений эксперименты проводились с использованием значений параметров режима как для графиков на рис. 4 и 5.

Анализ полученных результатов показал, что напряжение на дуге оказывает существенное влияние на частоту коротких замыканий дугового промежутка, а введение гексафторида серы в защитный газ, в свою очередь, изменяет характер этого влияния. С увеличением длины дугового промежутка эффект воздействия добавки SF₆ на характер переноса усиливается, что связано с большей длительностью взаимодействия капли расплавленного металла с активными компонентами омывающего его потока защитной газовой смеси.

При большем количестве SF₆ напряжение на дуге оказывает меньшее влияние на частоту отрыва капель электродного металла, т. к. повышенный потенциал ионизации F не позволяет дуге активно увеличиваться вследствие повышения напряжения. Анализ графиков показывает, что в целом при меньшем напряжении эффект влияния продуктов диссоциации SF₆ имеет меньшее значение (см. рис. 6).

Выводы

Таким образом, по результатам проведенных экспериментальных исследований установлено следующее.

1. Эффективность введения SF₆ в защитную газовую атмосферу при сварке ограничена 1 %...1,5 % (остальное смесь 82 % Ar + 18 % CO₂). Дальнейшее повышение концентрации компонента в защитной газовой смеси ведет к интенсивному насыщению наплавленного металла серой.

2. Ключевым параметром, определяющим интенсивность протекания металлургических реакций с продуктами диссоциации SF₆ при высоких температурах вблизи столба дуги и расплавленной сварочной ванны, является напряжение на дуге. Изменение напряжения на 4...5 В позволяет изменить количество серы в наплавленном металле более чем в 2 раза.

3. Введение SF₆ в рассматриваемых количествах в защитную газовую атмосферу при наплавке существенно изменяет традиционно известные закономерности между напряжением на дуге и частотой переноса электродного металла, что является следствием повышения эффективного потенциала ионизации газовой смеси (Ar + CO₂ + SF₆) в присутствии соединений F.

4. Выдвинута гипотеза о механизме снижения количества углерода в наплавленном металле путем связывания его в соединения CF₄ посредством интенсивно протекающих металлургических реакций на стадии капли расплавленного металла с адсорбированными свободными ионами фтора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паршин, С. Г. Исследование MIG-сварки стали S235JR с введением в аргон газообразного гексафторида серы SF₆ / С. Г. Паршин // Сварочное производство. – 2017. – № 1. – С. 9–13.
2. Фетисова, Е. А. Влияние гексафторида серы в составе газовой защитной атмосферы при дуговой сварке на содержание водорода в наплавленном металле / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. П. Кули-

ков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 174.

3. **Фетисова, Е. А.** Применение газообразных галоидных соединений в составе защитной газовой атмосферы при дуговой сварке / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев, В. П. Куликов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 165.

4. **Фетисова, Е. А.** Влияние напряжения на частоту переноса электродного металла при дуговой сварке с введением газообразных галоидных соединений в защитную газовую атмосферу / Е. А. Фетисова, А. О. Коротеев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 104.

Статья сдана в редакцию 31 января 2022 года

Екатерина Анатольевна Фетисова, аспирант, Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-297-44-42-82. E-mail: fetisova9891@gmail.com.

Артур Олегович Коротеев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-298-45-49-70. E-mail: karatseyeu_artur@fastmail.com.

Александра Александровна Коротеева, студент, Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-298-45-49-70.

Katsiaryna Anatolyevna Fiatsisava, PhD student, Belarussian-Russian University. Tel.: +375-297-44-42-82.
E-mail: fetisova9891@gmail.com.

Artur Olegovich Karatseyeu, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarussian-Russian University.
Tel.: +375-298-45-49-70. E-mail: karatseyeu_artur@fastmail.com.

Aliaksandra Aliaksandrovna Karatseyeva, student, Belarussian-Russian University. Tel.: +375-298-45-49-70.

DOI: 10.53078/20778481_2022_1_97

УДК 62-83:621

А. С. Коваль

**К ВОПРОСУ РАСЧЕТА УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ
В ДВИГАТЕЛЕ В ПУСКОТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ
РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛИФТА**

A. S. Koval

**ON CALCULATION OF CONTROLLED ELECTROMAGNETIC LOSSES IN THE
MOTOR DURING START-BRAKE OPERATION MODES OF ADJUSTABLE
ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE IN ELEVATORS**

Аннотация

На основе использования выражений рывка, ускорения и скорости для оптимальной S -тахограммы изменения скорости лифта предложена методика определения управляемых электромагнитных переменных потерь в асинхронном двигателе в переходных режимах работы и представлены результаты расчета этих потерь в приводе лифта.

Ключевые слова:

асинхронный двигатель с короткозамкнутым (к. з.) ротором, электропривод лифта, управляемые электромагнитные переменные потери, оптимальная S -тахограмма изменения скорости лифта, синусоидальный закон изменения рывка.

Для цитирования:

Коваль, А. С. К вопросу расчета управляемых электромагнитных потерь в двигателе в пускотормозных режимах работы регулируемого асинхронного электропривода лифта / А. С. Коваль // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 97–109.

Abstract

Based on the use of the expressions of jerk, acceleration and speed for the optimal S -tachogram of elevator speed change, a method is proposed for determining controlled electromagnetic variable losses in an asynchronous motor during transient operation modes and the results of calculating these losses in the elevator drive are presented.

Keywords:

asynchronous motor with a squirrel-cage (short circuited) rotor, elevator electric drive, controlled electromagnetic variable losses, optimal S -tachogram of elevator speed change, sinusoidal law of jerk change.

For citation:

Koval, A. S. On calculation of controlled electromagnetic losses in the motor during start-brake operation modes of adjustable asynchronous electric drive in elevators / A. S. Koval // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 97–109.

В настоящее время массовый электропривод лифтов – это асинхрон-

ный частотно-регулируемый электропривод с существенно меньшим энерго-

потреблением за счет формирования управляемых динамических режимов работы в сравнении с нерегулируемым электроприводом на базе двухскоростного асинхронного лифтового двигателя. Дальнейшее снижение энергопотребления в приводах лифтов связано с уменьшением потерь в самом электроприводе. Большая часть известных публикаций на эту тему применительно к асинхронным двигателям (АД) связана с оптимизацией мощности потерь в самом двигателе в установившихся режимах работы при применении оптимальных законов частотного управления (по минимуму статорного тока, по минимуму потребляемой мощности, по минимуму управляемой электромагнитной мощности и т. д.).

Оптимизация энергопотребления в динамических режимах – задача не тривиальная. Так как характер изменения частоты вращения двигателя в динамических режимах существенно влияет на потери в двигателе, то минимизация этих потерь связана с законом изменения частоты вращения [1]. С учетом вычислительных возможностей управляющих контроллеров возможна оптимизация энергопотребления в динамических режимах за счет формирования

определенной тахограммы в реальном времени.

Характер работы лифтов определяется интенсивными пускотормозными режимами с ограничением ускорения и рывка при формировании заданной тахограммы движения, что ограничивает возможности оптимизации потерь в приводе в этих режимах работы.

Показано [2], что S-образная тахограмма разгона и торможения кабины лифта, используемая сегодня в лифтах при изменении рывка кабины лифта в пускотормозных режимах по синусоидальному закону – это оптимальный закон разгона и торможения кабины лифта. Поэтому интересна не оптимизация потерь, а оценка мощности потерь в динамических режимах работы электропривода лифта с учетом задаваемой оптимальной тахограммы разгона и торможения кабины лифта.

Графики изменения рывка, ускорения и скорости при перемещении кабины лифта для S-образной тахограммы разгона и торможения кабины лифта (синусоидальный закон изменения рывка) с участком движения кабины лифта с постоянной скоростью показаны на рис. 1.

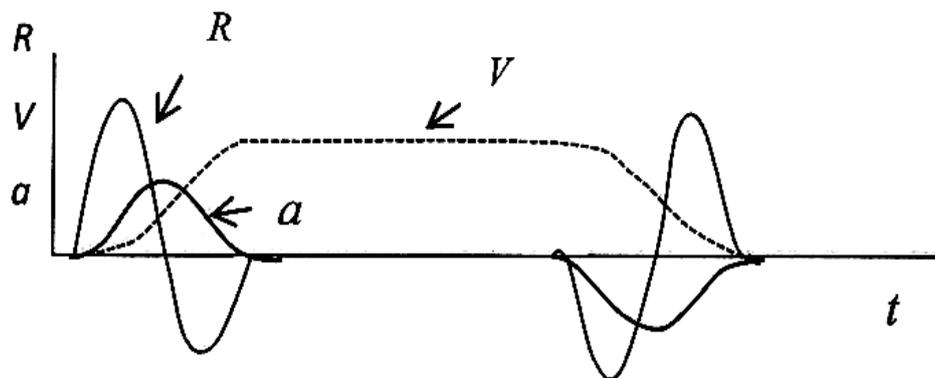


Рис. 1. Изменение рывка R , ускорения a и скорости V для S-образной тахограммы разгона и торможения кабины лифта (синусоидальный закон изменения рывка)

При пуске линейная скорость кабины лифта меняется по закону

$$V(t) = A_0^* \cdot t - A_1^* \cos(\Omega t), \quad \text{ускорение —}$$

$a(t) = A_0^*(1 - \cos(\Omega t))$, а рывок –
 $R(t) = r_m \cdot \sin(\Omega t)$. При торможении,
 соответственно,

$$V(t) = V_0 - A_0^*t + A_1^* \sin(\Omega t);$$

$$a(t) = \frac{r_m}{\Omega} (\cos(\Omega t) - 1);$$

$$R(t) = -r_m \cdot \sin(\Omega t),$$

где $A_0^* = \frac{r_m}{\Omega}$; $A_1^* = \frac{r_m}{\Omega^2}$; r_m – рывок;

$\Omega = \frac{2\pi}{T}$; T – время разгона (при пуске)

и торможения (при останове).

Для безредукторного электропривода лифта с диаметром канатоведущего шкива D соответствующий закон изменения частоты вращения вала двигателя определяется через радиус канатоведущего шкива $R_{шк} = \frac{D}{2}$ как

$$\omega(t) = \frac{V(t)}{R_{шк}}.$$

Эти выражения для скорости, рывка и ускорения могут быть использованы в модели, описывающей управляемые электромагнитные потери в двигателе в пускотормозных режимах работы. Управляемые электромагнитные потери в динамических режимах работы асинхронного двигателя скла-

дываются из потерь в сердечнике двигателя (потери на гистерезис и потери от вихревых токов) и омических потерь в обмотках статора и ротора [3]. В сумме они значительно превышают остальные составляющие потерь и являются основными потерями, которые принимаются для учета в моделях оценки мощности потерь в АД в пускотормозных режимах.

Для учета потерь в сердечнике используется формула Штейнмеца [3], учитывающая мощность потерь от гистерезиса и вихревых токов:

$$P_0 = k_1 \Psi_m^\gamma f_s + k_2 \Psi_m^2 f_s^2,$$

где Ψ_m – потокосцепление в воздушном зазоре; f_s – частота питающего напряжения; k_1 – коэффициент потерь гистерезиса, зависящий от материала и конструкции сердечника; k_2 – коэффициент потерь вихревых токов; γ – коэффициент, определяемый магнитными свойствами материала сердечника.

Возможна упрощенная оценка потерь в сердечнике асинхронного двигателя с к. з. ротором. Например, при учете только потерь в сердечнике от вихревых токов, зависящих от частоты в квадратичной зависимости, управляемые электромагнитные потери могут быть определены по выражению [4]

$$P_{pot} = \frac{3}{2} \left(R_s + R_r \frac{L_{12}^2}{L_r^2} \right) i_{sd}^2 - 3R_r \frac{L_{12}}{L_r^2} \Psi_r i_{sd} + \frac{3}{2} \left(R_s + R_r \frac{L_{12}^2}{L_r^2} \right) i_{sq}^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{R_r}{L_r^2} + p^2 \omega^2 \frac{L_{12}^2}{R_f L_r^2} \right) \Psi_r^2,$$

где R_s – сопротивление статора; R_r – сопротивление ротора; L_{12} – взаимная индуктивность; L_r – индуктивность ротора; Ψ_r – потокосцепление ротора; R_f – сопротивление, учитывающее потери в железе; i_{sd} , i_{sq} – составляющие тока статора по осям d и q ; p – число пар по-

люсов; ω – частота вращения двигателя.

Это выражение может быть преобразовано [4] к виду, зависящему только от потока ротора и момента двигателя M_d :

$$P_{pot} = k_1 \Psi_r^2 + k_2 \Psi_r \left(\frac{d\Psi_r}{dt} \right) + k_3 \left(\frac{d\Psi_r}{dt} \right)^2 + k_4 \frac{M_d^2}{\Psi_r^2}, \quad (1)$$

где $k_1 = \frac{3}{2} \left(\frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{p^2 \omega^2 L_{12}^2}{R_f L_r^2} \right)$; $k_2 = 3 \frac{R_s}{\eta L_{12}^2}$; $k_3 = \frac{3}{2\eta^2} \left(\frac{R_r}{L_r^2} + \frac{R_s}{L_{12}^2} \right)$; $k_4 = \frac{2}{3p^2} \left(\frac{R_s L_r^2}{L_{12}^2} + R_r \right)$;
 $\eta = \frac{R_r}{L_r}$.

Если учесть, что регулируемый электропривод переменного тока лифта с векторным управлением обеспечивает работу при постоянном потокоцеплении ротора двигателя $\left(\frac{d\psi_r}{dt} = 0 \right)$, то оценка потерь (1) может быть представлена в виде

$$P_{pot} = k_1 \Psi_r^2 + k_4 \frac{M_d^2}{\Psi_r^2},$$

где M_d – момент двигателя;
 $M_d = M_s \pm \frac{Jd\omega}{dt}$; M_s – статический момент нагрузки; J – приведенный к валу двигателя момент инерции привода.

С учетом знаков в уравнении для

момента двигателя (двигательный режим работы)

$$P_{pot} = k_1 \Psi_r^2 + k_4 \frac{\left(M_s + \frac{Jd\omega}{dt} \right)^2}{\Psi_r^2}$$

или

$$P_{pot} = \frac{3}{2} \left(\frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{p^2 \omega^2 L_{12}^2}{R_f L_r^2} \right) \Psi_r^2 + \frac{2}{3p^2} \left(\frac{R_s L_r^2}{L_{12}^2} + R_r \right) \frac{\left(M_s + \frac{Jd\omega}{dt} \right)^2}{\Psi_r^2}.$$

Преобразуем это выражение к виду

$$P_{pot} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[\frac{9}{4} \left(\frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{p^2 \omega^2 L_{12}^2}{R_f L_r^2} \right) + \frac{1}{p^2} \left(\frac{R_s L_r^2}{L_{12}^2} + R_r \right) \frac{\left(M_s + \frac{Jd\omega}{dt} \right)^2}{\Psi_r^4} \right]$$

или

$$P_{pot} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[k_1^* + k_2^* \omega^2 + \frac{k_3^*}{\Psi_r^4} \left(M_s + \frac{Jd\omega}{dt} \right)^2 \right],$$

где $k_1^* = \frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2}$; $k_2^* = \frac{9}{4} \frac{p^2 L_{12}^2}{R_f L_r^2}$; $k_3^* = \frac{1}{p^2} \left(\frac{R_s L_r^2}{L_{12}^2} + R_r \right)$.

После возведения в квадрат выражения для момента и соответствующих

преобразований

$$P_{pot} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[n_0 + n_1 \omega^2 + n_2 \frac{d\omega}{dt} + n_3 \left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 \right], \tag{2}$$

где $n_0 = \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} M_s^2$; $n_1 = \frac{9 p^2 L_{12}^2}{4 R_f L_r^2}$; $n_2 = \frac{2 \cdot M_s \cdot J}{\Psi_r^4} \cdot k_4^*$; $n_3 = \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot k_4^*$; $k_4^* = \frac{1}{p^2} \left(\frac{R_s L_r^2}{L_{12}^2} + R_r \right)$.

Для заданного закона изменения скорости кабины лифта (*S*-тахограмма) при пуске после дифференцирования выражения для скорости можно получить выражение для мощности основ-

ных электромагнитных потерь при пуске привода лифта в двигательном режиме (пуск привода, например, при подъеме кабины лифта с номинальной загрузкой):

$$P_{pot. \text{ пус. об. }} = \frac{2}{3} \cdot \Psi_r^2 \left(D_0 + D_1 \cdot t^2 - D_2 \cdot t \cdot \sin \Omega t - D_3 \cos \Omega t + D_4 \sin^2 \Omega t + D_5 \cos^2 \Omega t \right), \quad (3)$$

где $D_0 = n_0 + n_2 \cdot A_0 + n_3 \cdot A_0^2$; $D_1 = n_1 \cdot A_0^2$; $D_2 = n_1 \cdot \frac{2 \cdot A_0^2}{\Omega}$; $D_3 = n_2 \cdot A_0 + n_3 \cdot 2 \cdot A_0^2$;
 $D_4 = n_1 \cdot \frac{A_0^2}{\Omega^2}$; $D_5 = n_3 \cdot A_0^2$; $A_0 = \frac{A_0^*}{R_{\text{ук}}}$.

Выражение для D_0 может быть преобразовано в виде

$$D_0 = n_0 + n_2 \cdot A_0 + n_3 \cdot A_0^2 = \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} M_s^2 + \frac{2 \cdot M_s \cdot J}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0 + \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0^2 =$$

$$= \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s^2 + 2 M_s \cdot J + J^2 \cdot A_0^2) = \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s + J \cdot A_0)^2.$$

Составляющие с коэффициентами D_3 и D_5 с учетом полученного выра-

жения для D_0 преобразуются следующим образом:

$$- D_3 \cdot \cos \Omega t + D_5 \cdot \cos^2 \Omega t + \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s + J \cdot A_0)^2 = -(n_2 \cdot A_0 + n_3 \cdot 2 \cdot A_0^2) \cos \Omega t +$$

$$+ \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot A_0^2 \cdot k_4^* \cdot \cos^2 \Omega t + \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s + J \cdot A_0)^2 = - \left(\frac{2 \cdot M_s \cdot J}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0 + 2 \cdot \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0^2 \right) \times$$

$$\times \cos \Omega t + \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot A_0^2 \cdot k_4^* \cdot \cos^2 \Omega t + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s + J \cdot A_0)^2 + \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} =$$

$$= \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot \left[-(2 \cdot J \cdot A_0 (M_s + J \cdot A_0) \cos \Omega t) + J^2 A_0^2 \cdot \cos^2 \Omega t + (M_s + J \cdot A_0)^2 \right] + \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} =$$

$$= \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s + J \cdot A_0) - J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2 + \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2}.$$

Теперь составляющая

$$\begin{aligned} (D_1 \cdot t^2 - D_2 \cdot t \cdot \sin \Omega t + D_4 \sin^2 \Omega t) &= \frac{9 p^2 L_{12}^2}{4 R_f L_r^2} \cdot A_0^2 \cdot t^2 - \frac{9 p^2 L_{12}^2}{4 R_f L_r^2} \cdot \frac{2 \cdot A_0^2}{\Omega} t \cdot \sin \Omega t + \\ &+ \frac{9 p^2 L_{12}^2}{4 R_f L_r^2} \cdot \frac{A_0^2}{\Omega^2} \cdot \sin^2 \Omega t = \frac{9 p^2 L_{12}^2}{4 R_f L_r^2} \cdot A_0^2 \left(t^2 - \frac{2t}{\Omega} \cdot \sin \Omega t + \frac{1}{\Omega^2} \sin^2 \Omega t \right) = \\ &= \frac{9 p^2 L_{12}^2}{4 R_f L_r^2} \cdot A_0^2 \left(t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 = n_1 A_0^2 \left(t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2. \end{aligned}$$

С учетом этих преобразований исходное выражение для потерь (3) имеет вид:

$$P_{pot. нус. дв.} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[\frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot \left[(M_s + J \cdot A_0) - J \cdot A_0 \cos \Omega t \right]^2 + n_1 A_0^2 \left(t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Для случая при пуске двигателя, когда $M_d = M_s - \frac{J d\omega}{dt}$ (генераторный

режим работы), исходное выражение потерь имеет следующий вид:

$$P_{pot. нус. ген.} = \frac{3}{2} \left(\frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{p^2 \omega^2 L_{12}^2}{R_f L_r^2} \right) \Psi_r^2 + \frac{2}{3 p^2} \left(\frac{R_s L_r^2}{L_{12}^2} + R_r \right) \frac{\left(M_s - \frac{J d\omega}{dt} \right)^2}{\Psi_r^2}. \quad (5)$$

После возведения в квадрат выражения для M_d и с учетом обозначений,

принятых в (2), выражение потерь (5) можно представить в виде

$$P_{pot. нус. ген.} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[n_0 + n_1 \omega^2 - n_2 \frac{d\omega}{dt} + n_3 \left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 \right] \quad (6)$$

или

$$P_{pot. нус. ген.} = \frac{2}{3} \cdot \Psi_r^2 \left(\begin{array}{l} D_{00} + D_1 \cdot t^2 - \\ - D_2 \cdot t \cdot \sin \Omega t + \\ + D_{33} \cos \Omega t + \\ + D_4 \sin^2 \Omega t + \\ + D_5 \cos^2 \Omega t \end{array} \right), \quad (7)$$

где $D_{00} = n_0 - n_2 \cdot A_0 + n_3 \cdot A_0^2$; $D_{33} = n_2 \cdot A_0 - n_3 \cdot 2 \cdot A_0^2$.

Выражение D_{00} может быть преобразовано следующим образом:

$$D_{00} = n_0 - n_2 \cdot A_0 + n_3 \cdot A_0^2 = \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} M_s^2 - \frac{2 \cdot M_s \cdot J}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0 + \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0^2 =$$

$$= \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s^2 - 2 M_s \cdot J \cdot A_0 + J^2 \cdot A_0^2) = \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s - J \cdot A_0)^2.$$

Преобразуем выражение с коэффициентами D_{33} и D_5 с учетом D_{00} :

$$D_{33} \cdot \cos \Omega t + D_5 \cdot \cos^2 \Omega t + \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s - J \cdot A_0)^2 = (n_2 \cdot A_0 - n_3 \cdot 2 \cdot A_0^2) \cos \Omega t +$$

$$+ \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot A_0^2 \cdot k_4^* \cdot \cos^2 \Omega t + \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s - J \cdot A_0)^2 = \left(\frac{2 \cdot M_s \cdot J}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0 - 2 \cdot \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0^2 \right) \times$$

$$\times \cos \Omega t + \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot A_0^2 \cdot k_4^* \cdot \cos^2 \Omega t + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s - J \cdot A_0)^2 + \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} =$$

$$= \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot \left[(2 \cdot J \cdot A_0 (M_s - J \cdot A_0) \cdot \cos \Omega t) + J^2 A_0^2 \cdot \cos^2 \Omega t + (M_s - J \cdot A_0)^2 \right] + \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} =$$

$$= \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s - J \cdot A_0) + J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2 + \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2}.$$

С учетом вышеполученного преобразования составляющей $(D_1 \cdot t^2 - D_2 \cdot t \cdot \sin \Omega t + D_4 \sin^2 \Omega t)$ конеч-

ное выражение для потерь (7) в этом случае имеет вид:

$$P_{\text{пот. пус. ген.}} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[\frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s - J \cdot A_0) + J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2 + n_1 A_0^2 \left(t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Теперь с помощью преобразований, аналогичных преобразованиям, используемым при получении формулы (4), получим выражение управляемых электромагнитных потерь, но при торможении двигателя привода лифта с номинальной скорости для двух возможных значений момента двигателя в

соответствии с уравнением движения электропривода, т. е.

$$M_d = M_s + \frac{J d \omega}{dt}.$$

Исходное выражение потерь имеет вид (1), преобразованное – (2).

Для известного закона изменения скорости кабины лифта при торможении по S-образной тахограмме после дифференцирования выражение для

мощности основных электромагнитных потерь при торможении в двигательном режиме работы можно представить в виде

$$P_{\text{пот.торм.дв.}} = \frac{2}{3} \cdot \Psi_r^2 \left(\begin{aligned} &D_{01} - D_6 \cdot t + D_7 \cdot t^2 - D_8 \cdot t \cdot \sin \Omega t + \\ &+ D_9 \sin \Omega t + D_{22} \cos \Omega t + D_{11} \sin^2 \Omega t + D_{12} \cos^2 \Omega t \end{aligned} \right), \quad (9)$$

где $D_{01} = n_0 + n_1 \cdot A_{1*}^2 - n_2 \cdot A_0 + n_3 \cdot A_0^2$; $D_6 = 2 \cdot n_1 \cdot A_{1*} \cdot A_0$; $D_7 = n_1 \cdot A_0^2$; $D_8 = n_1 \cdot \frac{2 \cdot A_0^2}{\Omega}$;
 $D_9 = n_1 \cdot \frac{2 \cdot A_0 \cdot A_{1*}}{\Omega}$; $D_{22} = n_2 \cdot A_0 - n_3 \cdot 2 \cdot A_0^2$; $D_{11} = n_1 \cdot \frac{A_0^2}{\Omega^2}$; $D_{12} = n_3 \cdot A_0^2$; $A_{1*} = \frac{V}{R_{\text{ук}}}$.

Выражение для D_{01} может быть преобразовано следующим образом:

$$\begin{aligned} D_{01} &= n_0 + n_1 \cdot A_{1*}^2 - n_2 \cdot A_0 + n_3 \cdot A_0^2 = \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} M_s^2 + n_1 \cdot A_{1*}^2 - \frac{2 \cdot M_s \cdot J}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0 + \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0^2 = \\ &= \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s^2 - 2 M_s \cdot J \cdot A_0 + J^2 \cdot A_0^2) = \frac{9 R_s}{4 L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s - J \cdot A_0)^2 + n_1 \cdot A_{1*}^2. \end{aligned}$$

Выражение с коэффициентами D_{22} и D_{12} и с учетом составляю-

щей $\frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s - J \cdot A_0)^2$ имеет вид:

$$\begin{aligned} &D_{22} \cdot \cos \Omega t + D_{12} \cdot \cos^2 \Omega t + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s - J \cdot A_0)^2 = (n_2 \cdot A_0 - n_3 \cdot 2 \cdot A_0^2) \cos \Omega t + \\ &+ \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot A_0^2 \cdot k_4^* \cdot \cos^2 \Omega t + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s - J \cdot A_0)^2 = \left(\frac{2 \cdot M_s \cdot J}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0 - 2 \cdot \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0^2 \right) \cos \Omega t + \\ &+ \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot A_0^2 \cdot k_4^* \cdot \cos^2 \Omega t + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s - J \cdot A_0)^2 = \\ &= \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot \left[(2 \cdot J \cdot A_0 (M_s - J \cdot A_0) \cdot \cos \Omega t) + J^2 A_0^2 \cdot \cos^2 \Omega t + (M_s - J \cdot A_0)^2 \right] = \\ &= \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s - J \cdot A_0) + J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2. \end{aligned}$$

Для составляющей с коэффициентами D_6 и D_7 может быть получено выражение

$$\begin{aligned} \left(-D_6 \cdot t + D_7 \cdot t^2 + \frac{9}{4} \frac{p^2 L_{12}^2 \cdot A_{1*}^2}{R_f L_r^2} \right) &= -2 \cdot n_1 \cdot A_{1*} \cdot A_0 \cdot t + n_1 \cdot A_0^2 + n_1 \cdot A_{1*}^2 = \\ &= n_1 (-2 \cdot A_{1*} t \cdot A_0 + A_0^2 t^2 + A_{1*}^2) = n_1 (A_{1*} - t \cdot A_0)^2. \end{aligned}$$

Для составляющей с коэффициентами D_8 , D_9 и D_{11} может быть сделано следующее преобразование:

$$\begin{aligned} \left(-D_8 \cdot t \cdot \sin \Omega t + D_9 \sin \Omega t + D_{11} \sin^2 \Omega t + n_1 (A_{1*} - t \cdot A_0)^2 \right) &= \\ = -n_1 \cdot \frac{2 \cdot A_0^2}{\Omega} t \cdot \sin \Omega t + n_1 \cdot \frac{2 \cdot A_0 \cdot A_{1*}}{\Omega} \sin \Omega t + n_1 \cdot \frac{A_0^2}{\Omega^2} \sin^2 \Omega t + \\ + n_1 (A_{1*} - t \cdot A_0)^2 &= n_1 \left[(A_{1*} - t \cdot A_0) + \frac{A_0}{\Omega} \sin \Omega t \right]^2. \end{aligned}$$

В результате выражение для потерь (9) при торможении в двигательном режиме приобретает вид:

$$P_{pot. торм. об.} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[\frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s - J \cdot A_0) + J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2 + n_1 \left[(A_{1*} - t \cdot A_0) + \frac{A_0}{\Omega} \sin \Omega t \right]^2 \right].$$

Для момента двигателя $M_d = M_s - \frac{J d\omega}{dt}$ выражение потерь при торможении

$$P_{pot. торм. ген.} = \frac{2}{3} \cdot \Psi_r^2 \left(\begin{aligned} &D_{02} - D_6 \cdot t + D_7 \cdot t^2 - D_8 \cdot t \cdot \sin \Omega t + D_9 \sin \Omega t - \\ &- D_{44} \cos \Omega t + D_{11} \sin^2 \Omega t + D_{12} \cos^2 \Omega t \end{aligned} \right). \quad (10)$$

Новые коэффициенты в (10) – это $D_{02} = n_0 + n_1 \cdot A_{1*}^2 + n_2 \cdot A_0 + n_3 \cdot A_0^2$; $D_{44} = n_2 \cdot A_0 + n_3 \cdot 2 \cdot A_0^2$.

Коэффициент D_{02} может быть преобразован к виду

$$\begin{aligned}
 D_{02} &= n_0 + n_1 \cdot A_{1*}^2 + n_2 \cdot A_0 + n_3 \cdot A_0^2 = \frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} M_s^2 + \\
 &+ n_1 \cdot A_{1*}^2 + \frac{2 \cdot M_s \cdot J}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0 + \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0^2 = \\
 &= \frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s^2 + 2M_s \cdot J \cdot A_0 + J^2 \cdot A_0^2) = \\
 &= \frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s + J \cdot A_0)^2 + n_1 \cdot A_{1*}^2.
 \end{aligned}$$

Составляющая с коэффициентами D_6 и D_7 может быть преобразована следующим образом:

$$\begin{aligned}
 (-D_6 \cdot t + D_7 \cdot t^2 + n_1 \cdot A_{1*}^2) &= -2 \cdot n_1 \cdot A_{1*} \cdot A_0 + n_1 \cdot A_0^2 + n_1 \cdot A_{1*}^2 = \\
 &= n_1 (-2 \cdot A_{1*} t \cdot A_0 + A_0^2 t^2 + A_{1*}^2) = n_1 (A_{1*} - t \cdot A_0)^2.
 \end{aligned}$$

Составляющая выражения мощности потерь с коэффициентами D_8 , D_9 и D_{11} преобразуется к виду

$$\begin{aligned}
 (-D_8 \cdot t \cdot \sin \Omega t + D_9 \sin \Omega t + D_{11} \sin^2 \Omega t + n_1 (A_{1*} - t \cdot A_0)^2) &= \\
 = -n_1 \cdot \frac{2 \cdot A_0^2}{\Omega} t \cdot \sin \Omega t + n_1 \cdot \frac{2 \cdot A_0 \cdot A_{1*}}{\Omega} \sin \Omega t + n_1 \cdot \frac{A_0^2}{\Omega^2} \sin^2 \Omega t + \\
 + n_1 (A_{1*} - t \cdot A_0)^2 &= n_1 \left[(A_{1*} - t \cdot A_0) + \frac{A_0}{\Omega} \sin \Omega t \right]^2.
 \end{aligned}$$

Составляющая выражения мощности потерь с коэффициентами D_{44} и D_{12} имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & -D_{44} \cdot \cos \Omega t + D_{12} \cdot \cos^2 \Omega t + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s + J \cdot A_0)^2 = -(n_2 \cdot A_0 + n_3 \cdot 2 \cdot A_0^2) \cos \Omega t + \\
 & + \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot A_0^2 \cdot k_4^* \cdot \cos^2 \Omega t + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s + J \cdot A_0)^2 = -\left(\frac{2 \cdot M_s \cdot J}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0 + 2 \cdot \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot k_4^* \cdot A_0^2 \right) \times \\
 & \times \cos \Omega t + \frac{J^2}{\Psi_r^4} \cdot A_0^2 \cdot k_4^* \cdot \cos^2 \Omega t + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot (M_s + J \cdot A_0)^2 = \\
 & = \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot \left[(-2 \cdot J \cdot A_0 (M_s + J \cdot A_0) \cdot \cos \Omega t) + J^2 A_0^2 \cdot \cos^2 \Omega t + (M_s + J \cdot A_0)^2 \right] = \\
 & = \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s + J \cdot A_0) - J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2.
 \end{aligned}$$

Результирующее значение мощности потерь при торможении в генераторном режиме

торном режиме

$$P_{pot. \text{торм. ген.}} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[\frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s + J \cdot A_0) - J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2 + n_1 \left[(A_{1*} - t \cdot A_0) + \frac{A_0}{\Omega} \sin \Omega t \right]^2 \right].$$

Таким образом, значения мощности управляемых электромагнитных потерь в двигателе при пуске и торможении в двигательном и генераторном режимах работы имеют вид:

нии в двигательном и генераторном режимах работы имеют вид:

$$P_{pot. \text{торм. дв.}} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[\frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s - J \cdot A_0) + J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2 + n_1 \left[(A_{1*} - t \cdot A_0) + \frac{A_0}{\Omega} \sin \Omega t \right]^2 \right];$$

$$P_{pot. \text{пус. ген.}} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[\frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s + J \cdot A_0) - J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2 + n_1 A_0^2 \left(t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 \right];$$

$$P_{pot. \text{пус. дв.}} = \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[\frac{9}{4} \frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{k_4^*}{\Psi_r^4} \cdot [(M_s - J \cdot A_0) + J \cdot A_0 \cos \Omega t]^2 + n_1 A_0^2 \left(t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 \right].$$

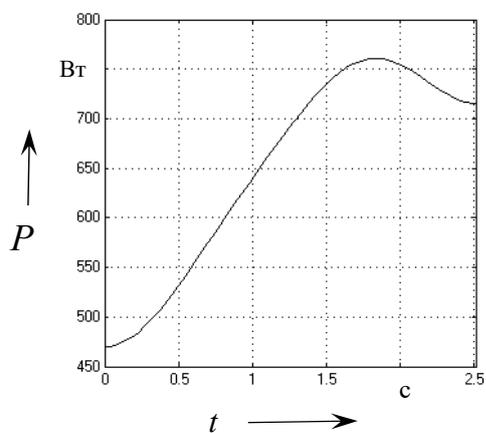
Расчетные зависимости мощности основных электромагнитных потерь для асинхронного высокомоментного двигателя с к. з. ротором (табл. 1) за время пуска и торможения (2,5 с)

при перемещении кабины безредукторного пассажирского лифта грузоподъемностью 630 кг и скоростью движения 1 м/с представлены на рис. 2 и 3.

Табл. 1. Параметры двигателя для расчетов мощности основных электромагнитных потерь

J , кг·м ²	R_1 , Ом	$M_{ном}$, Н·м	$I_{ном}$, А	$P_{ном}$, Вт	L_{12} , Гн	L_1 , Гн	R_2 , Ом	R_f , Ом	D , м	$\omega_{ном}$, с ⁻¹	r_m , м/с ²
4,5	2,47	336	11,87	4071	0,639	0,694	1,87	186	0,32	6,09	1

а)



б)

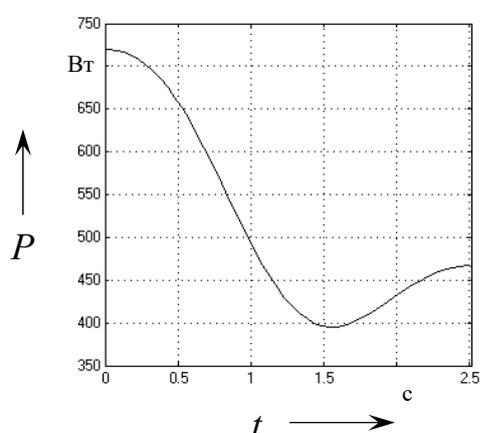
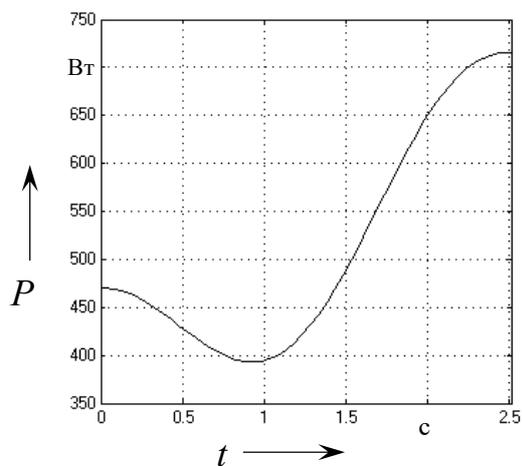


Рис. 2. Мощность потерь (двигательный режим) при пуске (а) и при торможении (б)

а)



б)

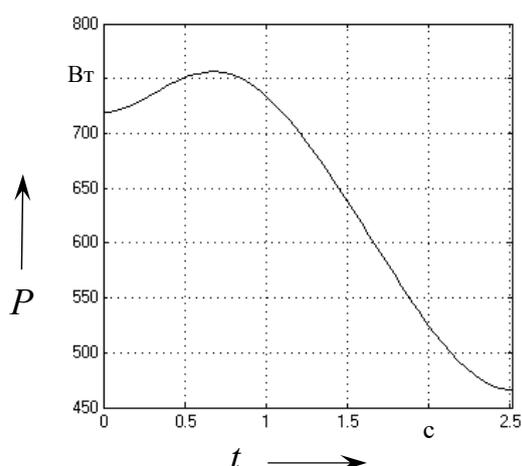


Рис. 3. Мощность потерь (генераторный режим) при пуске (а) и при торможении (б)

Выводы

Характер изменения частоты вращения двигателя в динамических режимах работы существенно влияет на потери в двигателе. В приводах лифтов возможности изменения тахограммы в пускотормозных режимах ограничены необходимостью поддержания ускорения на определенном уровне. С этой целью в приводах лифтов используется оптимальная S -тахограмма формирования скорости при пуске и торможении,

например, при синусоидальном изменении рывка. Для этого случая предложена методика расчета основных управляемых электромагнитных потерь в пускотормозных режимах в асинхронном двигателе электропривода лифта с векторным управлением. Полученные выражения мощности этих потерь для двигательных и генераторных режимов работы привода лифта могут быть использованы при оценке потерь за цикл работы и циклового КПД в асинхронном частотно-регулируемом приводе лифта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
2. **Чупрасов, В. В.** Реализация близкого к оптимальному закона движения скоростного пассажирского лифта с электроприводом переменного тока / В. В. Чупрасов, А. В. Шинянский // Тр. Моск. энергет. ин-та. – 1980. – Вып. 477. – С. 89–96.
3. **Борисевич, А. В.** Энергосберегающее векторное управление асинхронными электродвигателями / А. В. Борисевич. – Москва: ИНФРА-М, 2017. – 102 с.
4. **Stumper, J.-F.** Loss Minimization of Induction Machines in Dynamic Operation / J.-F. Stumper, A. Dotlinger, R. Kennel // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2013. – Vol. 28 (3). – P. 726–735.

Статья сдана в редакцию 24 декабря 2021 года

Александр Сергеевич Коваль, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Aleksandr Sergeyevich Koval, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481_2022_1_110

УДК 534.86

В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко

АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ТРЕХПЛАСТИНЧАТОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

V. I. Borisov, S. S. Sergeev, E. N. Prokopenko

ACOUSTIC RADIATION FIELD OF A THREE-LAYER PIEZOELECTRIC TRANSDUCER

Аннотация

Методом численного анализа рассчитано акустическое поле излучения акустических преобразователей в виде трех пьезоэлектрических пластин, расположенных параллельно друг другу. Показано, что уменьшение амплитуды акустических волн, генерируемых боковыми пластинами по сравнению с центральной, приводит к аподизации центрального лепестка диаграммы направленности, а соответствующий сдвиг фаз генерируемых акустических волн – к его сужению и раздвоению.

Ключевые слова:

акустическое поле, фазированная решетка, пьезоэлектрический преобразователь, акустическая ось, дальняя зона, ближняя зона, акустическая волна, акустическое давление, аподизация, полуширина акустического пучка, центральный лепесток диаграммы направленности.

Для цитирования:

Борисов, В. И. Акустическое поле излучения трехпластинчатого пьезоэлектрического преобразователя / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 110–117.

Abstract

The acoustic radiation field of acoustic transducers in the form of three piezoelectric plates located parallel to each other is calculated by the method of numerical analysis. It is shown that a decrease in the amplitude of acoustic waves generated by side plates compared to a central plate leads to apodization of the central lobe of the radiation pattern, and the corresponding phase shift of generated acoustic waves results in its narrowing and bifurcation.

Keywords:

acoustic field, phased array, piezoelectric transducer, acoustic axis, far zone, near zone, acoustic wave, acoustic pressure, apodization, acoustic beam half-width, central lobe of radiation pattern.

For citation:

Borisov, V. I. Acoustic radiation field of a three-layer piezoelectric transducer / V. I. Borisov, S. S. Sergeev, E. N. Prokopenko // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 110–117.

В настоящее время в практике неразрушающего акустического контроля в качестве источников и приемников акустических волн широкое применение находят фазированные акустические решетки (ФАР), содержащие набор элементарных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), реализующие более информативный акустический контроль материалов и технических изделий, в том числе благодаря перестройке акустического поля излучения-приема [1–3].

В предлагаемой работе приведены результаты численного расчета акустического поля излучения пьезоакустического преобразователя, работающего в непрерывном режиме возбуждения акустических волн, состоящего из трех прямоугольных пьезопластин, расположенных в одной плоскости параллельно друг другу.

Расчетная схема пьезопреобразователя площадью S приведена на рис. 1.

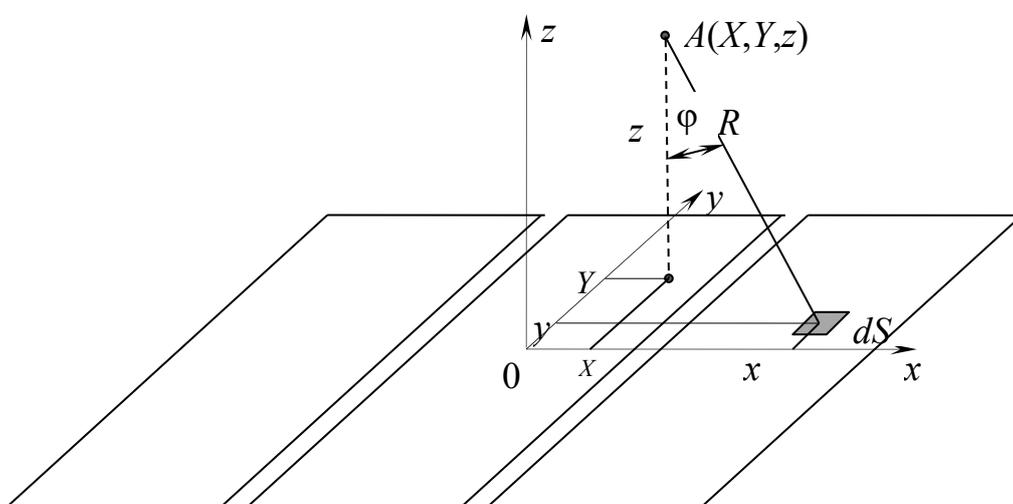


Рис. 1. Схема для расчета акустического поля трехпластинчатого пьезопреобразователя

Результирующая величина давления в точке A с координатами X, Y, z бу-

дет пропорциональна следующему интегралу [4, 5]:

$$P(X, Y, z) = \int_S \frac{P_0}{R} \cos \varphi \left(\cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} R + \psi_i \right) \right) dS. \quad (1)$$

В этом выражении R – расстояние от точечного излучателя площадью dS , расположенного в точке с координатами $x, y, 0$ до точки A .

k – модуль волнового вектора (волновое число), $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

λ – длина волны в материале среды, где распространяется акустическая волна.

φ – угол, учитывающий наклон

элементарной площадки dS к направлению на рассматриваемую точку.

ψ_i – начальная фаза акустической волны, излучаемой каждой из трех пьезопластиной ПЭП.

Расчет интеграла (1) проводился по методике, приведенной в [6]. Расчеты акустического поля излучения проводились для трех нагруженных на стальное изделие прямоугольных пьезопластин с размерами 17×5 мм для ча-

стоты возбуждения 5 МГц, что соответствует длине продольных волн в стали 1,2 мм. Расстояние между отдельными пьезопластинками выбиралось 1 мм. В целом излучающая область трехплощадочного ПЭП имеет размеры 17×17 мм.

На рис. 2 приведено распределе-

ние давления P акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП в направлении акустической оси z для случая, когда волны, генерируемые элементарными излучателями, на всех трех пластинах имеют одинаковую амплитуду и начальную фазу.

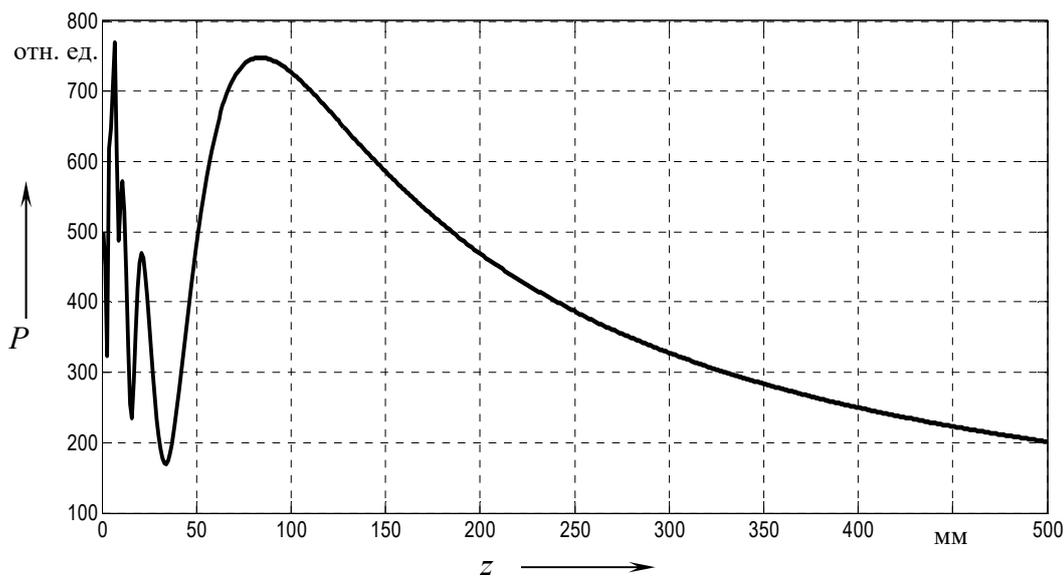


Рис. 2. Распределение давления акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП вдоль акустической оси

Из рис. 2 видно, что можно выделить ближнюю и дальнюю зоны ПЭП, где соответственно наблюдаются и отсутствуют осцилляции амплитуды давления акустических волн. На расстоянии 85 мм от пьезопластин наблюдается максимум давления акустических волн, при удалении от которого давление волн монотонно уменьшается. Для сравнения – проведенный анализ акустического поля, генерируемого одной квадратной пьезопластиной с размерами 17×17 мм, показал, что в средней и дальней зонах квадратной пьезопластины осевое распределение давления акустических волн носит характер такой же, как и у трехплощадочного ПЭП.

На рис. 3 и 4 приведено распределение давления P акустических волн в плоскости, перпендикулярной акустиче-

ской оси ПЭП, в области максимума на расстоянии 85 мм от пьезопластин в направлении координатных осей x и y соответственно.

Из приведенных рисунков видно, что акустическое поле имеет максимум на акустической оси ПЭП и носит неоднородный характер с боковыми максимумами, величина которых составляет почти 50 % от максимального давления на оси акустического пучка. Ширина акустического пучка в направлении оси x по уровню половинного максимального давления (полуширина) составляет 17 мм, а в направлении оси y – 15 мм.

Рассмотренная в работе схема трехпластинчатого ПЭП позволяет управлять параметрами акустического поля излучения путем изменения ам-

плитуд и начальных фаз генерируемых акустических волн на боковых пластинах по отношению к аналогичным параметрам на центральной пластине.

На рис. 5 приведено распределение давления P акустических волн для случая, когда акустические волны, гене-

рируемые элементарными излучателями на всех пластинах, имеют одинаковую начальную фазу, а на крайних пластинах – половинную амплитуду по отношению к амплитуде волн, генерируемых центральной пластиной.

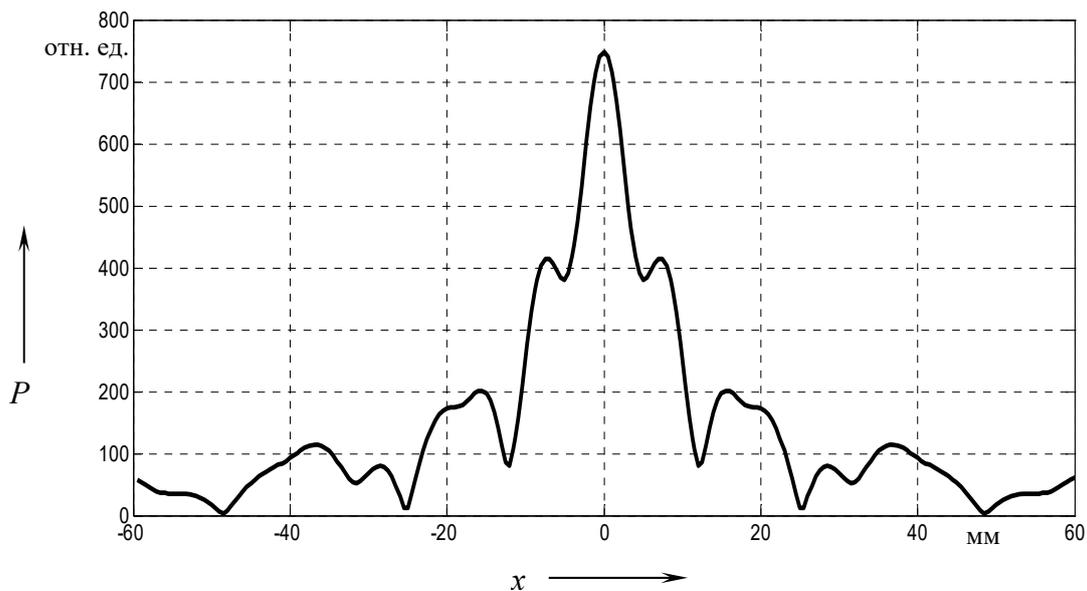


Рис. 3. Распределение давления акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП вдоль оси x

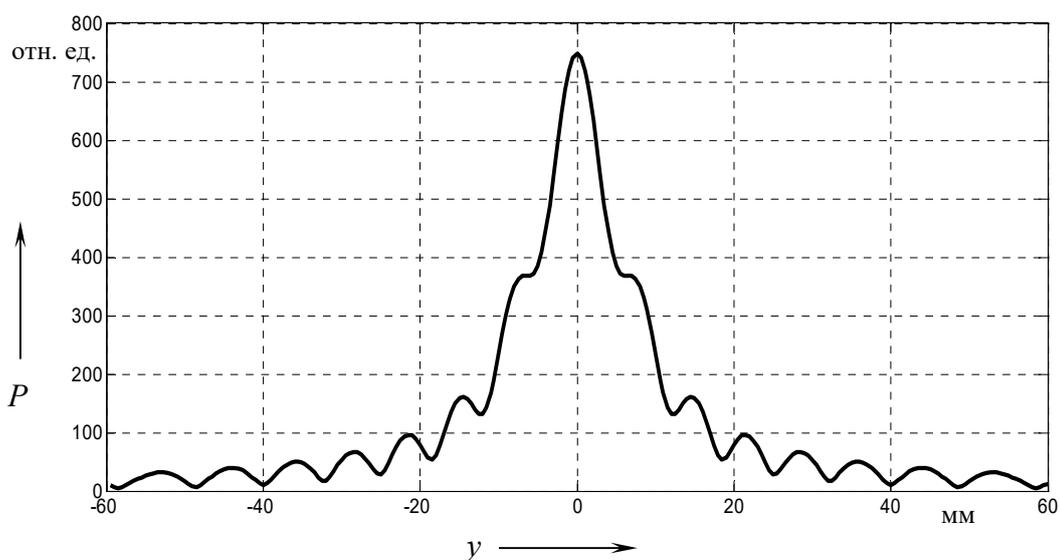


Рис. 4. Распределение давления акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП вдоль оси y

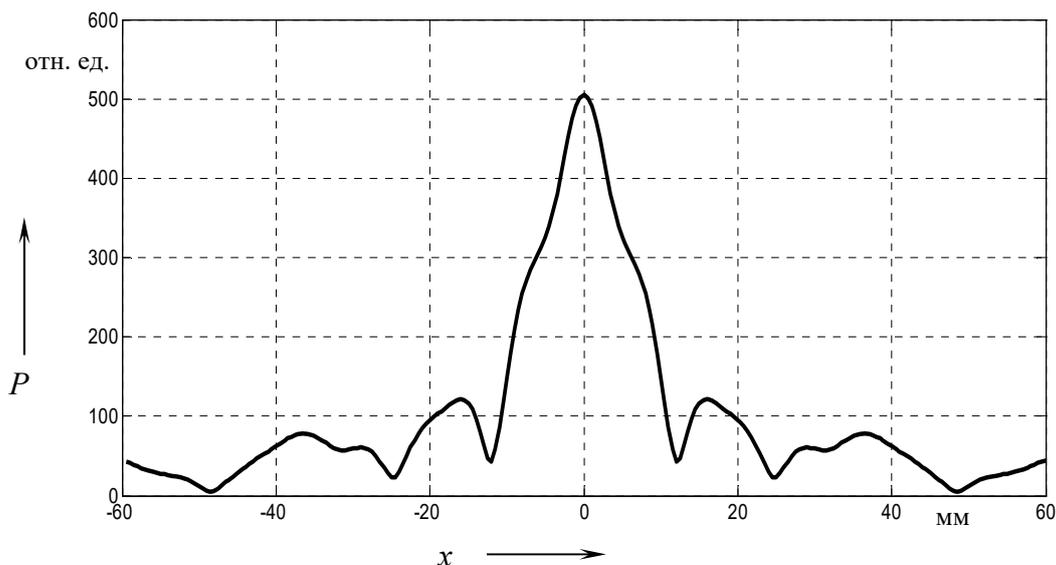


Рис. 5. Распределение давления акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП вдоль оси x при половинных амплитудах на крайних пластинах

Из рис. 5 видно, что при таких параметрах генерируемых акустических волн наблюдается сглаживание боковых максимумов, примыкающих к центральному. Используя аналогию похожего явления, наблюдаемого в оптике, это сглаживание боковых максимумов можно назвать аподизацией акустического пучка. Полуширина аподизированного акустического пучка в направлении оси x составляет 14 мм. Распределение же давления акустических волн вдоль оси y для рассматриваемого случая почти совпадает с аналогичным распределением для неаподизированного пучка, как на рис. 4, только при меньших величинах давления.

Сужение центрального лепестка диаграммы направленности рассматриваемого ПЭП можно получить, если реализовать для акустических волн, генерируемых на крайних пластинах, такую начальную фазу, при которой эти волны приходили бы в точку на акустической оси ПЭП, где наблюдается максимум результирующего давления акустических волн в одной и той же фазе, что и волны, генерируемые центральной

пьезопластиной.

Для рассматриваемой схемы ПЭП фазовая задержка между акустическими волнами, генерируемыми в центре крайних пластин, по отношению к волнам, генерируемым в центре центральной пьезопластины, составляет 1,12 рад. Введение этой фазовой задержки в расчеты акустического поля излучения ПЭП привело к смещению максимума в распределении давления акустических волн вдоль акустической оси с расстояния 85 мм к расстоянию 71,5 мм.

На рис. 6 приведено распределение давления акустических волн в направлении оси x для случая, когда акустические волны, генерируемые элементарными излучателями на всех пластинах, имеют одинаковую амплитуду, а на крайних пьезопластинах начальные фазы волн, генерируемых в центре пластин, выбраны такими, чтобы эти волны приходили в точку на расстоянии 71,5 мм от плоскости, где расположены пьезопластины, в одной фазе с волнами, генерируемыми в середине центральной пьезопластины.

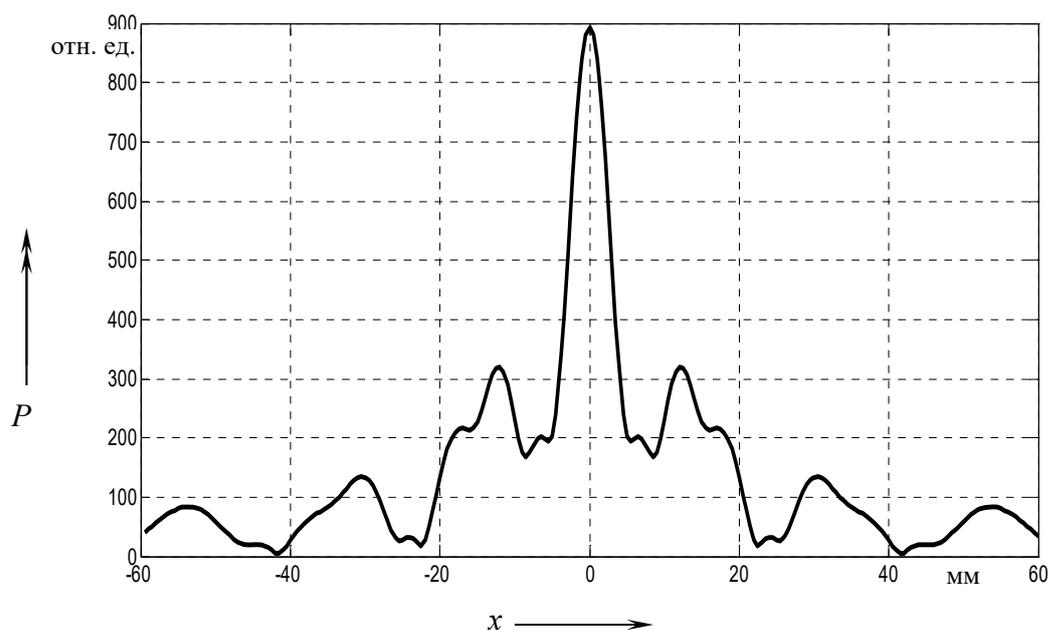


Рис. 6. Распределение давления акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП вдоль оси x при опережающих начальных фазах на крайних пластинах

Характерной особенностью акустического поля излучения ПЭП в этом случае является сужение центрального лепестка диаграммы направленности. Так, полуширина акустического пучка в направлении оси x составляет 6,5 мм, что в 2,6 раз меньше, чем полуширина акустического пучка при одинаковых фазах генерируемых волн на всех трех пьезопластинах.

Анализ распределения давления акустических волн в области максимума на расстоянии 71,5 мм от пьезопластин в направлении оси y показал, что оно отличается от распределения давления на рис. 4 только большими значениями величины давления в соответствующих точках оси, а полуширина акустического пучка составляет 15 мм.

Комбинированием величины фазового сдвига акустических волн, генерируемых на крайних и центральной пьезопластинах, можно осуществлять пространственное сканирование акустического пучка. Так, проведенные расчеты распределения давления P аку-

стических волн вдоль оси x показали, что опережение фазы генерируемых волн на левой пьезопластине на 1,12 радиан по отношению к начальным фазам излучения, генерируемого на центральной и правой пьезопластинах, приводит к смещению максимума акустического пучка на 1,4 мм от оси ПЭП, что видно на рис. 7. Расчеты проведены для волн, амплитуда которых на крайних пластинах имеет половинную амплитуду по отношению к амплитуде волн, генерируемых центральной пьезопластиной.

Опережение фазы генерируемых волн на правой пьезопластине на 1,12 рад по отношению к начальным фазам излучения, генерируемого на центральной и левой пьезопластинах, приводит к смещению максимума акустического пучка на 1,4 мм в другую сторону от оси ПЭП. Смещения акустического пучка в направлении оси y не наблюдается.

Рис. 8 иллюстрирует раздвоение акустического пучка вдоль оси x .

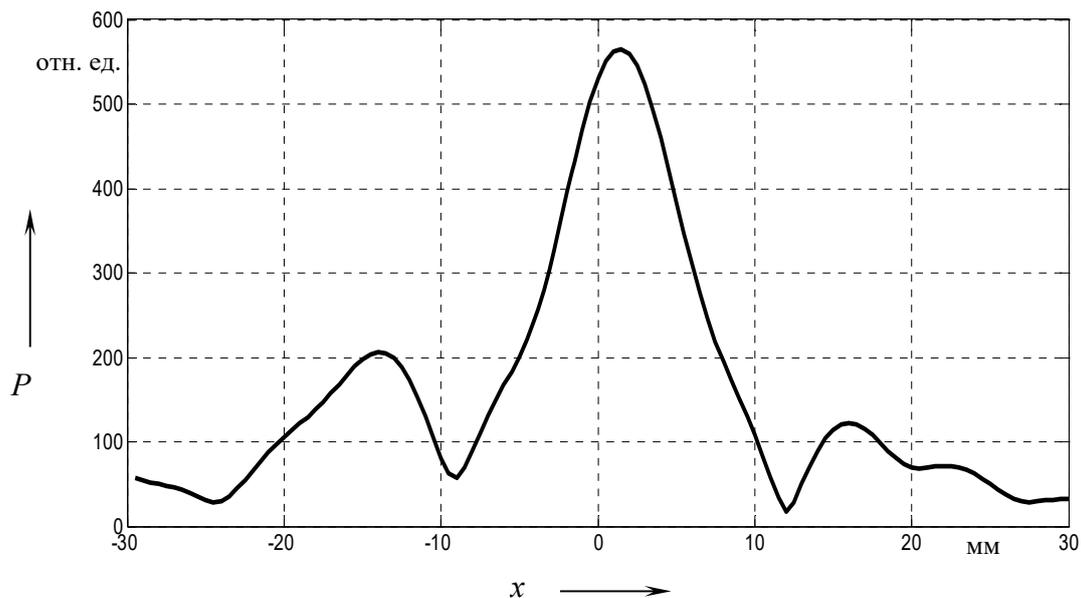


Рис. 7. Распределение давления акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП вдоль оси x при половинных амплитудах на крайних пластинах и опережающей фазе на левой пластине на 1,12 рад

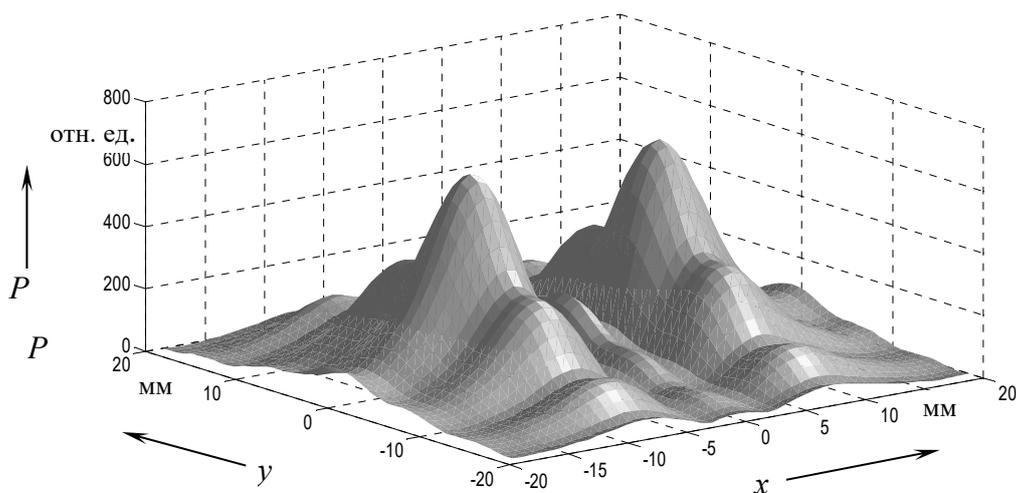


Рис. 8. Акустическое поле трехплощадочного ПЭП на расстоянии 85 мм при равных амплитудах на всех пластинах и опережающих фазах на крайних пластинах на 2,1 рад по отношению к фазе акустических волн на центральной пьезопластине

Введение в расчеты акустического поля опережающего сдвига фаз акустических волн, генерируемых крайними пьезопластинами, по отношению к волнам, генерируемым центральной пьезопластиной, приводит к раздвоению акустического пучка, что видно на рис. 8. В этом случае величина центрального

лепестка диаграммы направленности уменьшается, а боковых увеличивается. Конкретная разность между величиной боковых максимумов и центрального зависит от величины сдвига фаз и соотношения амплитуд акустических волн, генерируемых на боковых и центральной пьезопластинах. Например, при

опережающем сдвиге фаз 2,1 рад и одинаковых амплитудах волн на всех трех пьезопластинах соотношение между величиной боковых лепестков диаграммы направленности составляет 2,9:1. При таком же сдвиге фаз и половинных амплитудах волн на боковых пьезопластинах по отношению к амплитуде волн, генерированных на центральной пьезопластине, это соотношение составляет 5:1, а при амплитуде на боковых пьезопластинах 0,75 от амплитуды на центральной пьезопластине соотношение между величиной боковых лепестков диаграммы направленности составляет 5,7:1.

Таким образом, проведенные расчеты показали, что трехпластинчатая

схема ПЭП позволяет проводить аподизацию, пространственное смещение и раздвоение центрального лепестка диаграммы направленности за счет изменения начальных фаз и амплитуд акустических волн, излучаемых боковыми пьезопластинками по отношению к соответствующим параметрам акустических волн, генерируемых центральной пьезопластинкой ПЭП. При этом перестройку акустического поля излучения достаточно просто можно проводить и в динамическом режиме. Описанные возможности перестройки акустического поля излучения ПЭП можно использовать для повышения информативности неразрушающего акустического контроля материалов и изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фалькевич, С. А.** Фазированные решетки в ультразвуковой дефектоскопии (обзор) / С. А. Фалькевич // Дефектоскопия. – 1984. – № 3. – С. 3–16.
2. **Реука, С. В.** Введение в технологию применения ультразвуковых фазированных решеток / С. В. Реука. – Санкт-Петербург: СПГЭТУ ЛЭТИ, 2011. – 210 с.
3. Акустическое поле излучения пьезопреобразователя в виде двухмерной прямоугольной фазированной решетки / В. И. Борисов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 2 (71). – С. 58–67.
4. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И. Н. Ермолова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 280 с.
5. **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 2: Акустические методы контроля: практическое пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – Москва: Высшая школа, 1991. – 283 с.

Статья сдана в редакцию 12 января 2022 года

Василий Иванович Борисов, д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
Сергей Сергеевич Сергеев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: sss.bru@tut.by. Тел.: +375-297-43-38-68.
Елена Николаевна Прокопенко, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: enprokopenko@yandex.ru. Тел.: +375-293-28-23-97.

Vasily Ivanovich Borisov, DSc (Physics and Mathematics), Prof., Belarusian-Russian University.
Sergey Sergeevich Sergeev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: sss.bru@tut.by. Тел.: +375-297-43-38-68.
Elena Nikolayevna Prokopenko, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
E-mail: enprokopenko@yandex.ru. Тел.: +375-293-28-23-97.



DOI: 10.53078/20778481_2022_1_118

УДК 624.073.2

Ю. Н. Котов

**ДЕФОРМАЦИЯ ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТЫ НА РАЗНЫХ МОДЕЛЯХ
УПРУГОГО ОСНОВАНИЯ ПРИ УСЛОВИИ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
ПЛИТЫ**

Y. N. Kotov

**DEFORMATION OF THE FOUNDATION PLATE FOR DIFFERENT MODELS
OF ELASTIC FOUNDATION WITH RESTRICTIONS ON PLATE
DISPLACEMENTS**

Аннотация

Даны общие сведения о расчетах фундаментной плиты на упругом основании способом Б. Н. Жемочкина при условии ограничений на некоторые перемещения плиты. Рассмотрен случай плоской деформации для ленточного фундамента на разных моделях упругого основания, когда ряд точек балочной фундаментной плиты находится на одной прямой. Приведен пример расчета фундаментной плиты с четырьмя точками плиты, лежащими на одной прямой.

Ключевые слова:

перемещения плиты, фундаментная плита, способ Жемочкина, основание Винклера, упругий слой.

Для цитирования:

Котов, Ю. Н. Деформация фундаментной плиты на разных моделях упругого основания при условии ограничений на перемещения плиты / Ю. Н. Котов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 118–127.

Abstract

The paper presents general information on the calculation of a foundation plate on elastic foundation, based on the method of B. N. Zhemochkin with restrictions on some plate displacements. The case of plane deformation of a strip foundation is considered for different models of the elastic foundation, when several points of a beam foundation plate are on the same straight line. An example of the calculation of the foundation plate with four points of it lying on the same straight line is given.

Keywords:

plate displacements, foundation plate, Zhemochkin method, Winkler foundation, elastic foundation.

For citation:

Kotov, Y. N. Deformation of the foundation plate for different models of elastic foundation with restrictions on plate displacements / Y. N. Kotov // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 118–127.

Введение

Рассматривается статический расчет фундаментной плиты на упругом основании способом Б. Н. Жемочкина [1] при условии ограничений на некоторые перемещения плиты под действием вертикальной нагрузки. Теория и результаты решения контактных задач способом Жемочкина в пространственной постановке приведены в [2, 3]. Считается, что некоторые точки плиты при ее изгибе лежат на одной прямой. Такие перемещения фундаментной плиты вызываются неизвестными силами, приложенными к этим точкам плиты. То есть неизвестными являются контактные напряжения между фундаментной плитой и упругим основанием и неизвестные силы, приложенные к плите.

Статический расчет фундаментной плиты на упругом основании способом Б. Н. Жемочкина при условии ограничений на некоторые перемещения плиты можно выполнять с использованием различных моделей упругого основания. Например, модель Винклера применяется для расчета фундаментов на песчаных и слабых грунтах, а модель упругого основания в виде упругого слоя рекомендована действующими нормативными документами для расче-

та фундаментных балок.

Рассматриваемые в статье задачи возникают, например, при расчете многоэтажного здания, когда точки фундаментной плиты в местах стыка вертикальных стен и диафрагм жесткости должны находиться в одной плоскости. То же относится и к точкам базы металлической колонны на контакте сечения колонны и базы. Далее на конкретном примере рассматривается случай плоской деформации для ленточного фундамента при использовании разных моделей упругого основания и проводится сопоставление результатов.

Постановка задачи

Рассмотрим фундаментную балочную плиту на упругом основании под действием внешней нагрузки, вызывающей перемещения некоторых точек плиты по одной прямой (рис. 1). Требуется определить и сравнить контактные напряжения между плитой и упругим основанием (основание Винклера, упругий слой), ее перемещения, распределение изгибающих моментов и поперечных сил в сечениях плиты, величины внешних сил, вызывающих перемещения некоторых точек плиты по одной прямой.

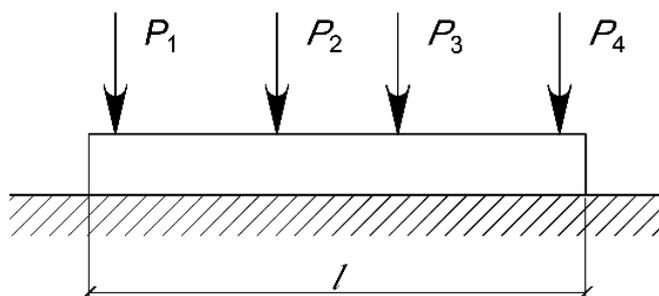


Рис. 1. Балочная плита на упругом основании

Алгоритм расчета

Расчет фундаментной плиты будем выполнять способом Жемочкина.

Разделим плиту на равные участки длиной Δx и в центре каждого участка поставим вертикальную связь, через которую осуществляется контакт плиты с

упругим основанием. Будем считать, что усилие в связи вызывает равномерное распределение контактных напряжений по всему участку.

Полученную многократно статически неопределимую систему решаем

смешанным методом строительной механики [4]. Для этого разрежем все связи и введем на конце плиты заделку. Получаем основную систему смешанного метода (рис. 2).

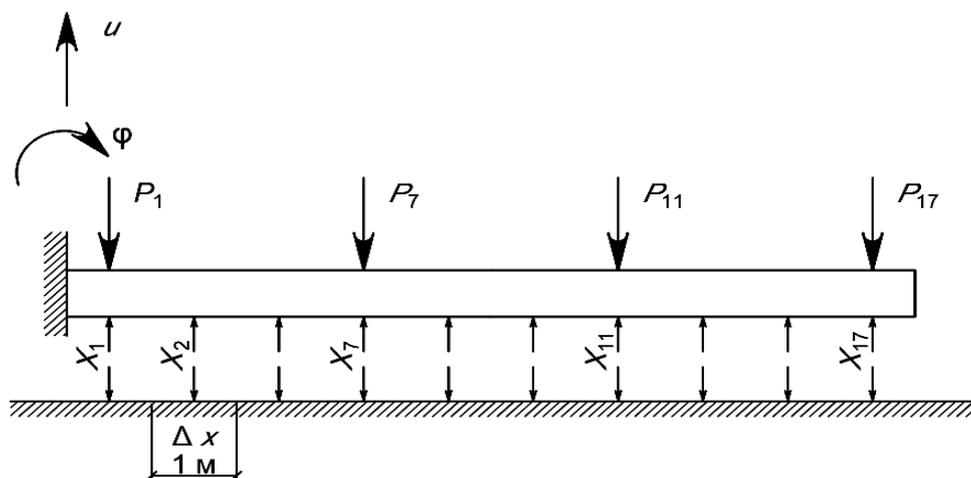


Рис. 2. Заданная система смешанного метода для расчета балочной плиты

Составим канонические уравнения смешанного метода, добавив к ним уравнения нахождения ряда точек на одной прямой.

При равнодействующей внешних сил, равной R , система имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^m \delta_{i,k} X_k + u + \varphi x_i + \sum_{k=1}^n y_{i,k} P_k = 0, \quad i = 1, \dots, m; \\ -\sum_{k=1}^m X_k + \sum_{k=1}^n P_k = 0; \\ -\sum_{k=1}^m x_k X_k + \sum_{k=1}^n x_{pk} P_k = 0; \\ -\sum_{k=1}^m F_{i,k} X_k + u' + \varphi'(x_i - x_{p1}) = 0, \quad i = 1, \dots, n; \\ \sum_{k=1}^n P_k = -R; \\ \sum_{k=1}^n x_{pk} P_k = -Ra_r, \end{array} \right. \quad (1)$$

где m – число участков Жемочкина на пластинке; n – число неизвестных сил, приложенных к точкам пластинки с перемещениями на одной линии;

x_{pk} – расстояние от защемления до участков, где приложены сосредоточенные неизвестные силы; X_k – неизвест-

ное усилие в связи Жемочкина на участке с номером k ; u, φ – неизвестные линейное и угловое перемещения введенного в начале балочной плиты защемления; u', φ' – неизвестные линейное и угловое перемещения прямой, на которой расположены n неизвестных сил. Принято за u' перемещение первой точки, где приложена сила P_1 ; $\delta_{i,k}$ – взаимное вертикальное перемещение разрезанной связи Жемочкина с номером i , состоит из двух слагаемых: первое представляет собой перемещения центра участка с номером i упругого основания от единичной силы, распределенной равномерно по участку с номером k ($i=1, \dots, m$), ($k=1, \dots, m$) и определяется для основания Винклера по формуле $\delta_{i,k} = \frac{1}{Kb\Delta x} + y_{i,k}$, где K – коэффициент постели [5]; b – ширина балочной плиты, для упругого слоя – по формуле $\delta_{i,k} = \frac{1-v_0^2}{\pi E_0 \Delta x} F_{i,k} + y_{i,k}$, где выражение для $F_{i,k}$, $y_{i,k}$ приводится ниже. Для некоторых иных моделей упругого основания выражения для $F_{i,k}$ можно

также найти в [1, 7]; P_k – неизвестная сила, приложенная к центру участка на пластинке с номером k ($k=1, \dots, m$); x_{pk} – абсцисса точки приложения неизвестных сил; $y_{i,k}$ – вертикальное перемещение (прогиб) центра участка Жемочкина с номером i на балочной плите с защемлением от единичной силы, приложенной к центру участка плиты с номером k ($i=1, \dots, m$), ($k=1, \dots, m$). Определяется по формуле, приведенной ниже; Δx – размер прямоугольного участка Жемочкина; E_0, v_0 – упругие постоянные слоя; R, a_r – равнодействующая внешних сил и абсцисса ее приложения на балочной плите.

Как было отмечено выше, коэффициенты при неизвестных $\delta_{i,k}$ в уравнениях (1) зависят от перемещений упругого основания от действия равномерно распределенной по участку Б. Н. Жемочкина единичной силы и прогибов консольной балки от внешних сил.

Согласно [6, 7], вертикальные перемещения упругого основания в виде упругой полосы от сосредоточенной силы P определяются по формуле

$$W(x) = \frac{2P(1-v^2)}{\pi E} \int_0^\infty \frac{ch2u-1}{sh2u+2u} \frac{\cos(u(\frac{x-\xi}{h}))}{u} du, \quad (2)$$

где h – толщина сжимаемого слоя.

Для $L(u) = \frac{ch2u-1}{sh2u+2u}$ примем аппроксимацию, отличную от приведенной в [7]:

$$L'(u) = th \frac{u}{2} + \frac{u^3}{24ch2u}. \quad (3)$$

Точность принятой аппроксимации характеризует рис. 3, где изображены графики функций $L(u)$

$$\text{и } L'(u) = th \frac{u}{2} + \frac{u^3}{24ch2u}.$$

Отметим, что функция $L'(u) = th \frac{u}{2} + \frac{u^3}{24ch2u}$ по сравнению с приведенной в [7], как и $L(u)$, является нечетной функцией.

Интегрируя выражение (2) с принятой аппроксимацией в пределах $x_i < a_k, a_k < x_i < b_k, x_i > b_k$ (рис. 4), получаем:

– если $x_i < a_k$, то

$$F_{ik} = \left(\begin{aligned} & \frac{1}{\pi} h \left(\ln \left[\operatorname{cth} \left[\frac{\pi(b_k + x_i)}{2h} \right] \right] \ln \left[1 + \operatorname{cth} \left[\frac{\pi(b_k - x_i)}{2h} \right] \right] + \right. \\ & \left. + \operatorname{Li}_2 \left[1 - \operatorname{cth} \left[\frac{\pi(b_k - x_i)}{2h} \right] \right] + \operatorname{Li}_2 \left[-\operatorname{cth} \left[\frac{\pi(b_k - x_i)}{2h} \right] \right] \right) - \\ & - \frac{1}{\pi} h \left(\ln \left[\operatorname{cth} \left[\frac{\pi(a_k + x_i)}{2h} \right] \right] \ln \left[1 + \operatorname{cth} \left[\frac{\pi(a_k - x_i)}{2h} \right] \right] + \right. \\ & \left. + \operatorname{Li}_2 \left[1 - \operatorname{cth} \left[\frac{\pi(a_k - x_i)}{2h} \right] \right] + \operatorname{Li}_2 \left[-\operatorname{cth} \left[\frac{\pi(a_k - x_i)}{2h} \right] \right] \right) + ; \\ & + \frac{1}{24 \cdot 16} h \pi^2 \left(\begin{aligned} & \operatorname{sh} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{4h} \right] \operatorname{th} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{4h} \right] - \\ & - \operatorname{sh} \left[\frac{\pi(-b_k + x_i)}{4h} \right] \operatorname{th} \left[\frac{\pi(-b_k + x_i)}{4h} \right] \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) \quad (4)$$

– если $a_k < x_i < b_k$, то

$$F_{ik} = \left(\begin{aligned} & \frac{2h\pi}{3} + \frac{1}{\pi} h \left(\ln \left[\operatorname{cth} \left[\frac{\pi(b_k - x_i)}{2h} \right] \right] \ln \left[1 + \operatorname{cth} \left[\frac{\pi(b_k - x_i)}{2h} \right] \right] + \right. \\ & \left. + \operatorname{Li}_2 \left[1 - \operatorname{cth} \left[\frac{\pi(b_k - x_i)}{2h} \right] \right] + \operatorname{Li}_2 \left[-\operatorname{cth} \left[\frac{\pi(b_k - x_i)}{2h} \right] \right] \right) + \\ & + \frac{1}{\pi} h \left(\ln \left[\operatorname{cth} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{2h} \right] \right] \ln \left[1 + \operatorname{cth} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{2h} \right] \right] + \right. \\ & \left. + \operatorname{Li}_2 \left[1 - \operatorname{cth} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{2h} \right] \right] + \operatorname{Li}_2 \left[-\operatorname{cth} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{2h} \right] \right] \right) + ; \\ & + \frac{1}{24 \cdot 16} h \pi^2 \left(\begin{aligned} & \operatorname{sh} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{4h} \right] \operatorname{th} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{4h} \right] - \\ & - \operatorname{sh} \left[\frac{\pi(-b_k + x_i)}{4h} \right] \operatorname{th} \left[\frac{\pi(-b_k + x_i)}{4h} \right] \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) \quad (5)$$

– если $x_i > b_k$, то

$$F_{ik} = \left(\begin{aligned} & \frac{1}{\pi} h \left(\ln \left[\operatorname{cth} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{2h} \right] \right] \ln \left[1 + \operatorname{cth} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{2h} \right] \right] + \right. \\ & \left. + \operatorname{Li}_2 \left[1 - \operatorname{cth} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{2h} \right] \right] + \operatorname{Li}_2 \left[-\operatorname{cth} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{2h} \right] \right] \right) - \\ & - \frac{1}{\pi} h \left(\ln \left[\operatorname{cth} \left[\frac{\pi(-b_k + x_i)}{2h} \right] \right] \ln \left[1 + \operatorname{cth} \left[\frac{\pi(-b_k + x_i)}{2h} \right] \right] + \right. \\ & \left. + \operatorname{Li}_2 \left[1 - \operatorname{cth} \left[\frac{\pi(-b_k + x_i)}{2h} \right] \right] + \operatorname{Li}_2 \left[-\operatorname{cth} \left[\frac{\pi(-b_k + x_i)}{2h} \right] \right] \right) + \\ & + \frac{1}{24 \cdot 16} h \pi^2 \left(\begin{aligned} & \operatorname{sh} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{4h} \right] \operatorname{th} \left[\frac{\pi(-a_k + x_i)}{4h} \right] - \\ & - \operatorname{sh} \left[\frac{\pi(-b_k + x_i)}{4h} \right] \operatorname{th} \left[\frac{\pi(-b_k + x_i)}{4h} \right] \end{aligned} \right) \end{aligned} \right), \quad (6)$$

где $Li_s(z)$ – полилогарифмическая функция, определяемая как бесконечный степенной ряд $Li_s(z) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{z^k}{k^s}$ [8].

Прогибы балки, если $x_i > x_k$, находятся по формуле [1]

$$y_{ik} = \frac{x_i^2}{6EI} (3x_k - x_i). \quad (7)$$

Если $x_i < x_k$, то следует x_i и x_k поменять местами.

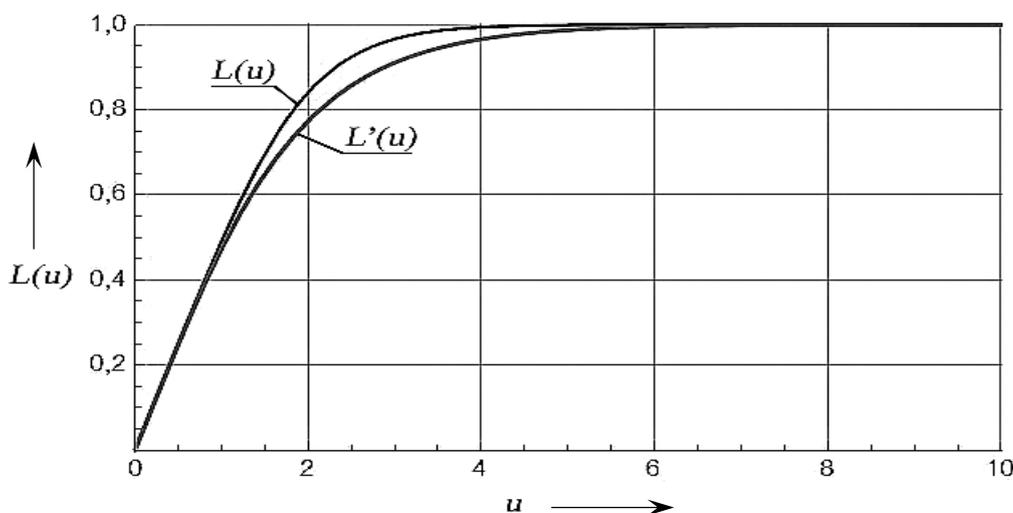


Рис. 3. График точного и аппроксимированного выражения для $L(u)$

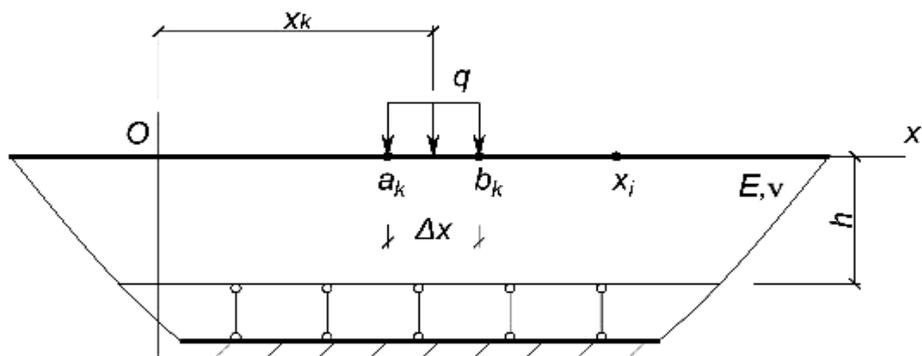


Рис. 4. К определению вертикальных перемещений полосы от действия равномерно распределенной нагрузки

Таким образом, формируется система (1), решением которой являются неизвестные усилия в стержнях, силы, приложенные к балке, а также неизвестное перемещение и угол поворота.

Результаты расчета

Расчет выполнялся для ленточного фундамента, когда четыре точки фундаментной плиты находятся на одной прямой. Длина и ширина фундаментной плиты $l = 17$ м, $b = 1$ м; толщина плиты и упругие постоянные бетона $H = 0,2$ м, $\nu_b = 0,17$, $E_b = 2,9 \cdot 10^4$ МПа; упругое основание $h = 5$ м, $E_0 = 3 \cdot 10^7$ Па, $\nu_0 = 0,35$; коэффициент постели определялся по

формуле [3] и получился равным $K = 9629,63$ кН/м³. Принято, что равнодействующая внешних сил равна единице и проходит через середину плиты. Количество участков Жемочкина принято равным 17. Силы P_1, P_2, P_3, P_4 неизвестны и вызывают одинаковые перемещения точек 1, 7, 11, 17 плиты. На рис. 5–9 показаны графики распределения контактных напряжений и перемещений, эпюр моментов и поперечных сил, графики со значениями внешних сил P , вызывающих перемещения четырех точек по одной прямой. Как видно, наибольшие перемещения и напряжение получаются под силами.

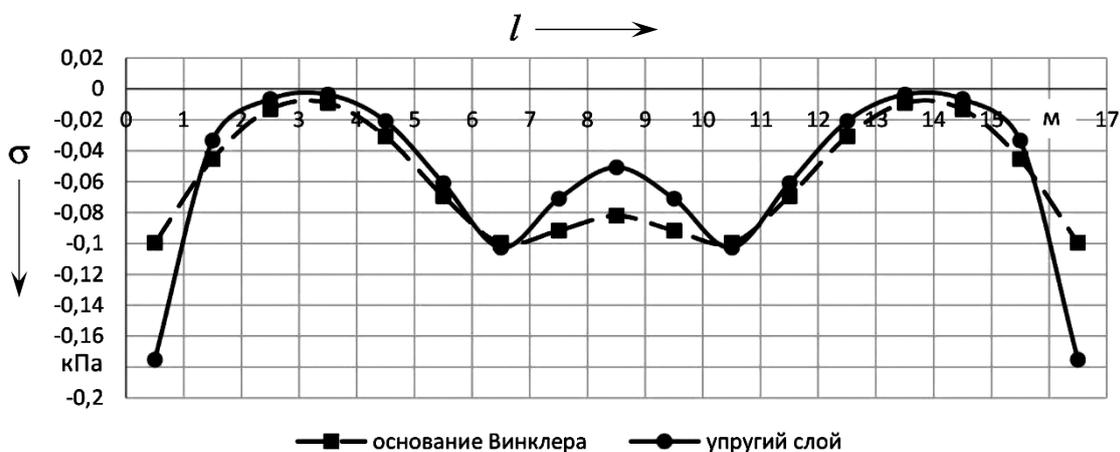


Рис. 5. Графики распределения напряжений

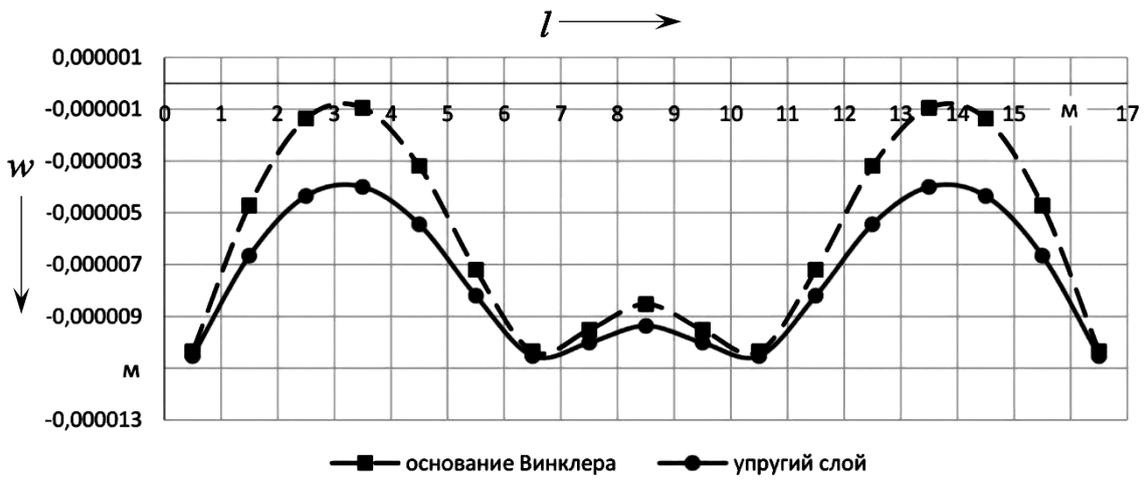


Рис. 6. Графики распределения перемещений

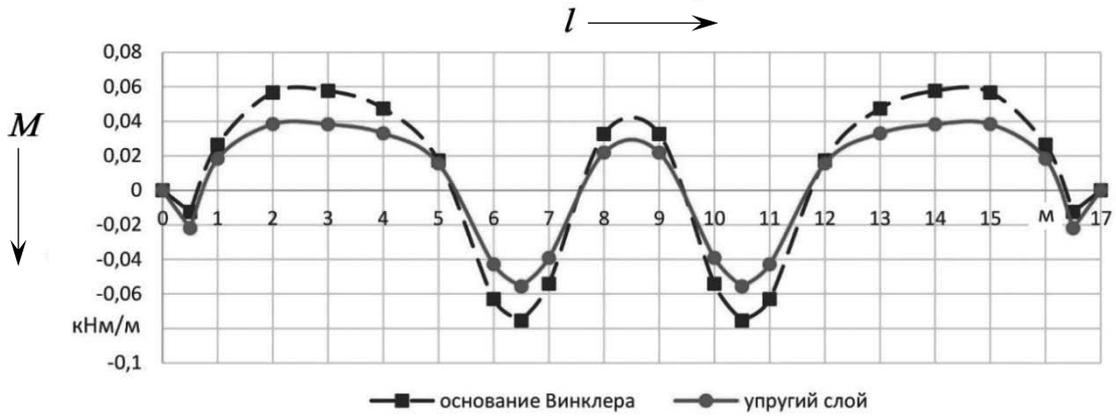


Рис. 7. Эпюры моментов

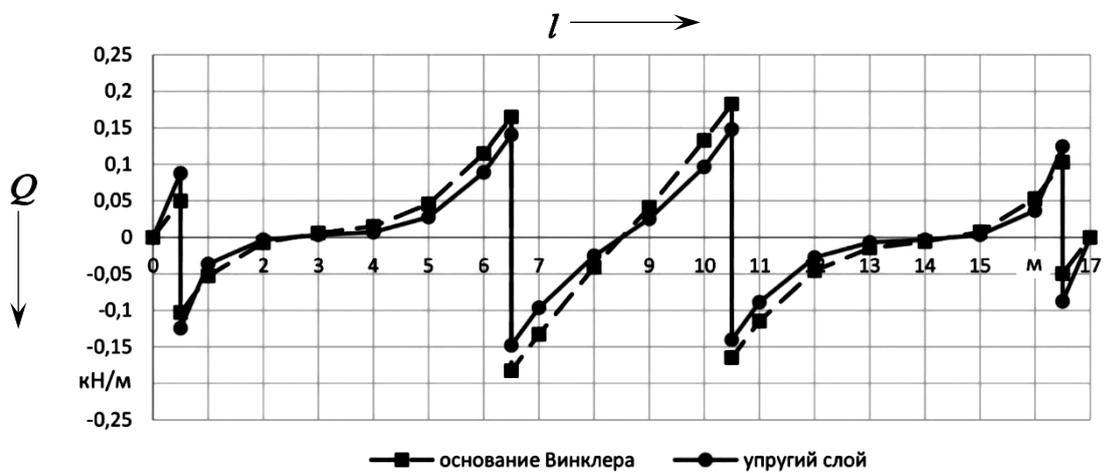


Рис. 8. Эпюры поперечных сил

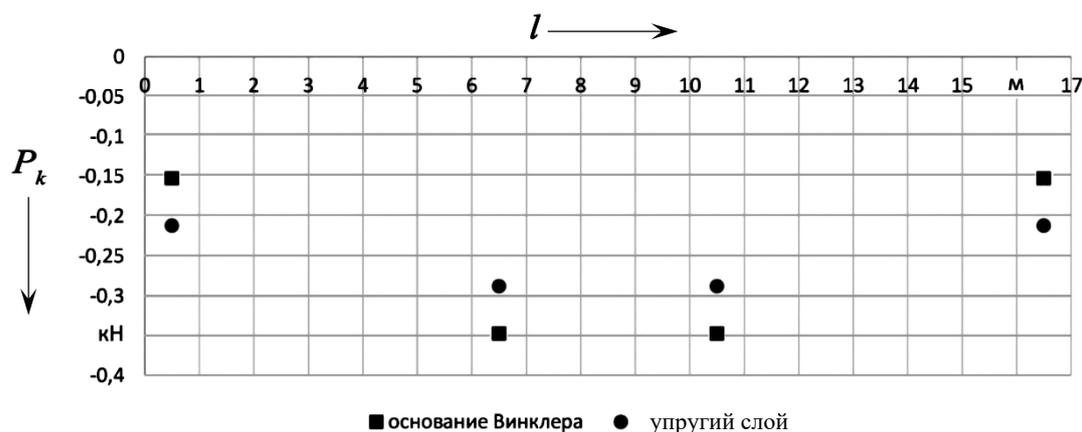


Рис. 9. Значения внешних сил

Сопоставив полученные выше результаты для двух моделей упругого основания, наблюдаем значительное изменение в распределении напряжений в центре и по краям фундаментной плиты в местах приложения неизвестных сил. Значения на эпюрах моментов и поперечных сил стали меньше, а на графике перемещений осадка в точках приложения неизвестных сил почти не изменилась.

Все расчеты выполнялись в программном комплексе *Wolfram Mathematica 12.2*. [9, 10].

Заключение

В работе впервые изложена методика расчета фундаментной плиты на упругом основании способом Жемочкина при условии ряда точек плиты, лежащих на одной прямой. Предлагаемая

методика может быть использована для разных моделей упругого основания и при произвольном числе точек, лежащих на одной прямой. Показано выражение для нахождения перемещений упругой полосы от равномерно распределенной по участку ее поверхности нагрузки. Приведены результаты расчета фундаментной плиты: распределения контактных напряжений и перемещений, эпюры моментов и поперечных сил, значения внешних сил – для двух различных моделей упругого основания (основание Винклера, упругий слой). Сравнение экспериментальных величин показывает, что наблюдается различие в результатах двух расчетов.

Полученные результаты могут быть пригодны для использования, в частности, при расчете ленточных фундаментов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

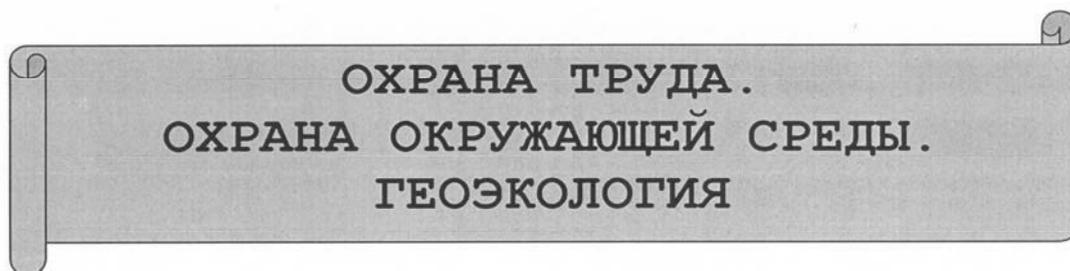
1. Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Сеницын. – Москва: Стройиздат, 1962. – 239 с.
2. Козунова, О. В. Осесимметричная контактная задача для круглой плиты на нелинейно-упругом основании под действием сосредоточенных сил / О. В. Козунова, Д. М. Гурский // Механика. Исследования и инновации. – 2019. – № 12 (12). – С. 113–120.
3. Скачек, П. Д. Пространственная контактная задача опирания балки на четвертьпространство / П. Д. Скачек, С. В. Босаков // Новые горизонты – 2019: сб. материалов Белорус.-Китайского молодежного инновац. форума, Минск, 12–13 нояб. 2019 г. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 181–183.

4. **Ржаницын, А. Р.** Строительная механика / А. Р. Ржаницын. – Москва: Высшая школа, 1991. – 439 с.
5. **Горбунов-Посадов, М. И.** Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. – Москва: Стройиздат, 1984. – 639 с.
6. **Ворович, И. И.** Неклассические смешанные задачи теории упругости / И. И. Ворович, В. М. Александров, В. А. Бабешко. – Москва: Наука, 1974. – 456 с.
7. **Босаков, С. В.** Статические расчеты плит на упругом основании / С. В. Босаков. – Минск: БНТУ, 2002. – 128 с.
8. **Градштейн, И. С.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – Москва: Физматгиз, 1963. – 1100 с.
9. **Дьяконов, В. П.** Mathematica 5/6/7. Полное руководство / В. П. Дьяконов. – Москва: ДМК Пресс, 2009. – 624 с.
10. **Половко, А. М.** Mathematica для студента / А. М. Половко. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2007. – 368 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 12 января 2022 года

Юрий Николаевич Котов, магистр техн. наук, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-03-88-25.

Yuriy Nikolayevich Kotov, MSc (Engineering), PhD student, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-296-03-88-25.



DOI: 10.53078/20778481_2022_1_128

УДК 502

В. В. Лихачев

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ
ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ ФАБРИК ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ
АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

V. V. Likhachyov

**IMPROVING BIOLOGICAL TREATMENT PROCESSES OF PULP AND PAPER
MILLS BY INTRODUCING ALTERNATIVE METHODS FOR INDUSTRIAL
WASTEWATER TREATMENT**

Аннотация

Приведены сведения об особенностях загрязнения водных объектов целлюлозно-бумажными предприятиями и описана типовая схема очистки загрязненных сточных вод. Проведен анализ особенностей биологической очистки. Предложено смешивать производственные стоки данных предприятий с хозяйственно-бытовыми с целью повышения эффективности биологической очистки загрязненных производственных стоков. Обосновано успешно реализованными мероприятиями. Возможно использование метода в текстильном, агропромышленном и пищевом производстве.

Ключевые слова:

целлюлозно-бумажная промышленность, загрязняющие стоки, технология очистки стоков, органические загрязняющие вещества, биологическая очистка.

Для цитирования:

Лихачев, В. В. Совершенствование процессов биологической очистки целлюлозно-бумажных фабрик путем внедрения альтернативных методов очистки сточных вод / В. В. Лихачев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 128–135.

Abstract

Information about the peculiarities of pollution of water bodies by pulp and paper enterprises is given and a common scheme for the purification of polluted wastewater is described. The analysis of the features of biological treatment has been carried out. It is proposed to mix industrial polluted wastewater from these enterprises with utilities wastewater in order to increase the efficiency of biological treatment of contaminated industrial wastewater. It is substantiated by successfully implemented activities. The method can be used in textile, agro-industrial and food production.

Keywords:

pulp and paper industry, polluting industrial wastewater, industrial wastewater treatment technology, organic pollutants, biological treatment.

© Лихачев В. В., 2022

For citation:

Likhachyov, V. V. Improving biological treatment processes of pulp and paper mills by introducing alternative methods for industrial wastewater treatment / V. V. Likhachyov // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 128–135.

Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности являются не только крупными потребителями ресурсов водного объекта, но и загрязнителями поверхностных вод легко- и трудноокисляемыми соединениями, образованными в процессе их производственной деятельности, которые напрямую оказывают существенное воздействие на биоту связанного с ними водного объекта.

Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности имеют различные источники образования загрязненных сточных вод, образующихся при подготовке реагентов, в ходе варки измельченной щепы в варочном растворе, при промывке целлюлозного полуфабриката, а также при его отбеливании, во время прессования и высушивания целлюлозы и, наконец, в процессе выпаривания щелочных растворов.

Ключевыми источниками загрязнения природных вод при производстве целлюлозы преимущественным – сульфатным – методом считаются отбельные, варочные и сульфатные цеха. Кроме того, возможно попадание в водоёмы волокон древесины, коры и древесных отходов, а также выброс дурнопахнущих веществ.

Несомненно, состав стоков обусловливается способом получения целлюлозы и зависит от номенклатуры продукции. Промышленные стоки, образованные в ходе производственной деятельности целлюлозно-бумажных предприятий, характеризуются различными органическими и неорганическими веществами (большая часть которых приходится на органику), зависящими от технологии и способа производства целлюлозосодержащего продукта. В основном это могут быть волокна целлю-

лозы (потери около 6 %), смоляные жирные кислоты, содержащие опасные токсичные соединения (фенолы, формальдегид), лигнин, а также присутствующие в стоках соединения, характеризующиеся как дурнопахнущие (сульфиды, метилмеркаптан, метан), и некоторые потери в виде сульфатных или сульфидных щелочей.

В целом в стоках фабрик будут содержаться волокна целлюлозы, мелкие частицы бумаги, органика и минеральные составляющие, частицы клея и подобных эмульсий. Цвет таких стоков может колебаться в широком диапазоне. Наконец, абсолютно все стоки фабрик целлюлозно-бумажной промышленности характеризуют специфический запах и повышенная температура.

Таким образом, предприятия целлюлозно-бумажной промышленности оказывают негативное воздействие на экологические характеристики связанных с ними водных объектов, которые отражаются на экологической обстановке местности, где они расположены, а также на здоровье жителей ближайших населенных пунктов. Такая особенность позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на наличие водоочистных сооружений на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности, необходимо их постоянное совершенствование для обеспечения экологического и иного благополучия населения и окружающей среды [1, 2].

Следует добавить, что при совершенствовании водоочистных сооружений необходимо отдавать предпочтение таким технологиям, которые могли бы быть наиболее эффективны при минимальных затратах, чтобы в рамках существования рыночной системы хозяйство-

вания обеспечить их окупаемость – ключевую составляющую экономической обоснованности [3].

Описание типовой схемы очистки промышленных сточных вод

В процессе очистки загрязненная вода (в большинстве случаев) последовательно проходит через этапы механической, биологической и физико-химической очистки. Данная типовая схема заключается в постепенном удалении загрязняющих компонентов от наиболее крупных до мелкодисперсных легко- и трудноокисляемых частиц, обеспечивая равномерный процесс и оптимальную эффективность очистки в зависимости от размера данных частиц. Подробнее типовая схема очистки стоков приводится далее.

Сначала на этапе предварительной механической очистки загрязненная вода постепенно проходит через решетки, чтобы обеспечить задержание крупного мусора, а затем – через сооружения песколовков и жироловок. Воздействие силы тяжести обеспечивает быстрое осаждение тяжелых мелких частиц, песка, а разница плотности жидкостей позволяет всплывать жировой пленке для её последующего отделения и уничтожения.

Предварительно очищенные от мусора и крупных частиц сточные воды попадают на стадию предварительной аэрации в преаэратор, где происходит перенасыщение стоков сжатым воздухом, необходимым для дальнейшего эффективного биоценоза аэробных бактерий. Ступеней преаэрации может быть несколько, чаще всего одна или две, либо вовсе они могут отсутствовать в зависимости от выбранной предприятием оптимальной технологии очистки. Также на данной стадии происходит продувка всевозможных соединений (в том числе сернистых), при которой они способны разлагаться в процессе их

возможного окисления.

Завершение стадии механической очистки чаще всего происходит в искусственных, радиальных (вертикальных) отстойниках. В ходе этой стадии на дне сооружения осаждаются загрязняющие компоненты, которые не смогли отделиться на решетках и песколовках, прошли сквозь них и остались в стоках. Осаждение считается наиболее простым и экономичным методом для сепарации твердой и жидкой фаз. Конструктивная особенность таких сооружений заключается в том, что большая ширина (диаметр) при относительно небольшой глубине котлована (емкости резервуара) позволяет отстаивать в сооружениях большие объемы мутной воды для осаждения частиц. Днище сооружения выполнено в форме перевернутого конуса, дает возможность концентрировать плотно осевшие накопившиеся загрязняющие частицы (шлам) для их более эффективного удаления и обеспечения в наибольшей степени эффективности сооружений-отстойников. Ускорить процесс осаждения возможно совместно с внедрением физико-химического способа – добавлением в отстойники флокулянта и/или коагулянта – веществ, способных связывать между собой или адсорбировать загрязненные частицы по необходимости.

Далее наступает стадия биологической очистки, которая происходит в естественных или искусственно созданных сооружениях. Обеспечение данного процесса осуществляется под воздействием активного ила – биоценоза зоогенных скоплений (колоний) бактерий и простейших одноклеточных организмов. Биологическая очистка загрязненных стоков проводится с целью удаления (разложения, окисления) из них легко- и трудноокисляемых загрязняющих органических веществ, образованных в ходе производственной деятельности предприятия. Подробнее данный этап очистки с его особенно-

стями будет рассмотрен автором далее.

На сегодняшний день совершенным преимуществом обладают искусственные сооружения биологической очистки, т. к. происходящие в нем процессы поддаются мониторингу и активному управлению, а также имеют много больший период эксплуатации по сравнению с естественными сооружениями и более приспособлены к реконструкции.

Последним этапом является процесс доочистки стоков, который предполагает вторичное осаждение загрязняющих компонентов с целью разделить твердую и жидкую фазы, обеспечив осветление очищаемых стоков. В данном случае агентом твердой фазы является использованный активный ил, часть которого после осаждения снова будет направлена в повторный цикл биологической очистки на аэротенки, а избыточная с помощью илососов будет направлена в емкости илоуплотнители, после которых будет произведено его обезвоживание и утилизация на полигоне.

Отделенная жидкая фаза, как показывает практика водоочистных сооружений ведущих предприятий России и всего мира, поступает на стадию доочистки – дополнительной фильтрации (например, дисковые фильтры) и обеззараживания – и уже затем может сбрасываться в водные объекты [4–6].

Анализ особенностей биологической очистки промышленных сточных вод

Автором исследования предлагается модернизация очистки стоков на этапе биологической очистки, поэтому прежде чем предлагать мероприятия для совершенствования, необходимо определить особенности активного ила. Сложную систему микроорганизмов активного ила составляют представители простейших и микроводорослей. Наиболее известными важными представителями являются инфузория, амеба, коловратка, хиладанелла, жгутиконосцы и

тихоходки, а также множество бактерий и грибов.

Как было отмечено, биологическая очистка заключается в удалении (разложении) органических веществ простейшими микроорганизмами под действием ферментов до простых неопасных соединений. Поглощая и перерабатывая органические вещества, они снижают уровень загрязнения по таким показателям, как БПК и ХПК в выходных стоках после очистки, практически перед выпуском в водный объект. При этом органические вещества производственных стоков: клеи, эмульсии, содержащие в том числе фенолы и формальдегиды, а также углеводы, белки, спирты, жиры, соли фосфатов и аммония – являются источником питательных веществ и энергии жизнедеятельности микроорганизмов, с одной стороны, и загрязняющими веществами для всей биоты водоемов, представляя для них опасность, с другой. Конечным продуктом переработки простейших являются вода, углекислый газ, метан, а также воссозданный в ходе их размножения активный ил. Микроорганизмы постоянно погибают при завершении их жизненного цикла. Но в этом нет никакой опасности: они неядовитые и растворяются в воде.

Микроорганизмы в зависимости от их жизнедеятельности и способа воздействия на органические загрязнители подразделяются на аэробные и анаэробные. Аэробные микроорганизмы способны к существованию и жизнедеятельности только в присутствии кислорода, который жизненно необходим для дыхания микроорганизмов, осуществления и поддержания окислительных процессов органики. При недостаточном уровне кислорода и в ходе его расхода в процессе окисления микроорганизмы перестанут справляться с возлагаемой на них нагрузкой и вскоре могут погибнуть. Поэтому необходимо дополнительно насыщать воду кислородом,

который содержится в сжатом воздухе. Уникальность аэробов заключается в том, что их дыхание происходит вследствие непосредственного окисления метана, водорода, солей азота, фосфора, а также сероводорода.

Анаэробные микроорганизмы, в свою очередь, являются неотъемлемой составляющей совокупности микроорганизмов и противоположны аэробным. Они способны вести свою жизнедеятельность и осуществлять процессы разложения органики в ограниченном количестве кислорода либо при полном его отсутствии. Заменой кислороду и важным составляющим в цикле жизнедеятельности является азот. Анаэробные организмы, в отличие от аэробов, составляют меньшую часть активного ила. Их схожесть заключается в том, что в ходе жизнедеятельности представители обоих типов выделяют тепло, но анаэробные меньше. Ключевая особенность анаэробных организмов заключается в том, что разложение обусловлено гниением активного ила с выделением большого количества биогаза, в составе которого более половины объема приходится на метан, а также сероводорода, углекислого газа. Поэтому при целесообразности и экономической обоснованности следует проектировать метантенки, с помощью которых будет аккумулироваться метан и подаваться в котлы для сжигания излишнего активного ила и/или отопления помещений, чтобы не допустить чрезмерного влияния метана на парниковый эффект атмосферы.

Для осуществления эффективной жизнедеятельности микроорганизмов необходимо создавать и поддерживать для них определенные условия, заключающиеся в создании комфортной среды.

1. Непрерывное присутствие в воде кислорода. Чем его будет больше, тем быстрее и эффективнее будет протекать процесс биоразложения. Поэтому имеет смысл подавать сжатый воздух по перфорированным трубам, уложенным

на дне аэротенков, обеспечивая так называемый «барботаж» активного ила.

2. Оптимальная температура в диапазоне от 12 °С до 30 °С, а также показатель кислотности рН воды в диапазоне значений 6,5...8,5 и отсутствие токсинов. Небольшое отклонение от заданных значений будет ингибировать процесс, а сильное и вовсе способно уничтожить популяцию активных микроорганизмов.

3. Наличие в очищаемых стоках различных органических веществ для обеспечения питания и источника энергии, а при их недостатке – необходимость восполнить подкормкой в виде фосфатных или азотных соединений (например, ортофосфорная кислота или аммонийные соли, карбамид).

4. Условия эксплуатации и проектные мощности сооружений биологической очистки:

- подача стоков на сооружения без перегрузки или недобора поступающих на сооружения стоков;

- степень загрязнения (насыщенности) органическими соединениями для достижения требуемой эффективности;

- регулирование избыточного ила, его своевременный вывод из цикла с целью недопущения перегнивания и выделения из него побочных нежелательных токсичных соединений (метан, метилмеркаптан, цианиды, сероводород) [7].

Таким образом, были приведены основные условия, позволяющие реализовывать процесс биологической очистки загрязненных стоков. При этом необходимо искать такие возможности, благодаря которым будет осуществимо непрерывное совершенствование системы водоочистных сооружений, которое могло бы удовлетворять принципам устойчивого развития – большей эффективности при минимуме затрат без ущерба окружающей среде.

**Исследование особенностей
хозяйственно-бытовых стоков.
Преимущества и нюансы**

Автором исследования предлагается альтернативный метод биологической очистки сточных производственных вод, заключающийся в смешении коммунальных муниципальных стоков, прошедших предварительную механическую очистку.

Потенциальные преимущества внедрения способа.

1. Вследствие жизнедеятельности человека хозяйственно-бытовые стоки обладают обогащенным содержанием биоразлагаемой массы (белки, липиды, жиры, углеводы, спирты, соединения фосфатов и аммонийной группы), которая является обогащенным источником питания и энергии для осуществления активной жизнедеятельности микроорганизмов.

2. Данный подход позволит сократить объем подкормки (например, ортофосфорной кислоты и карбамида), которая будет частично замещена содержанием подобных соединений в хозяйственно-бытовых стоках.

3. Смешение двух видов стоков предоставит возможность сбалансировать значение температуры и достичь её оптимальных значений, необходимых для создания комфортных условий микробиоты. Как правило, производственные стоки обладают повышенной температурой (около 40 °С...60 °С); коммунальные стоки из-за своей невысокой температуры способны нормировать значение смешанных стоков в диапазоне от 15 °С до 30 °С (в зависимости от времени года).

Осуществление данного метода предлагается автором обеспечивать в сооружении смесительной камеры и последующей преаэрацией перед первичными отстойниками. При отсутствии крупного мусора производственные стоки могут сразу направляться в сме-

сительную камеру, а хозяйственно-бытовые должны пройти этап механической очистки, в которой будут задержаны различные виды сложно-разрушающегося мусора, образованного в процессе жизнедеятельности человека, например, ватные палочки, волосы, нетканые салфетки, а также строительный мусор и различные виды крупного мусора, древесины – доски, балки. В смесительной камере также предполагается осуществление подачи подкормки в виде фосфатов и аммонийных солей, необходимых для достижения оптимального баланса эффективной деятельности микроорганизмов.

Таким образом, активно участвующие в разложении микроорганизмы перерабатывают стоки гораздо эффективнее, быстрее и в большем объеме. Перенасыщенность стоков активным илом и постоянное снабжение воздухом создают стремительное биохимическое окисление загрязняющих органических веществ, позволяя многократно снизить незадолго до выпуска очищенных стоков такие показатели загрязнения, как БПК и ХПК [8, 9].

При внедрении данного подхода следует обеспечивать такие условия, при которых процесс будет управляемым. Первым общим важным условием, по мнению автора, является внедрение системы непрерывного активного мониторинга, позволяющей отслеживать всевозможные необходимые показатели (температура, рН-показатель, напор подачи и объем стоков, объем активного ила) для своевременного принятия управленческих решений. Другими частными важными условиями являются:

– непрерывная продувка (аэрация) активного ила, где он принимает непосредственное участие в биоразложении органики до этапа вторичных отстойников, где его необходимо будет отделять и удалять;

– подкормка микробиоты необходимыми агентами (по необходимо-

сти) для предотвращения замедления их жизнедеятельности.

Вместе с этим на завершении этапа биологической очистки немаловажно предусмотреть внедрение стадии доочистки, т. к. вторичные источники не способны достичь требуемого уровня очистки и прозрачности очищенных стоков. Этап доочистки должен включать в себя систему дисковых фильтров для обеспечения тонкой механической очистки от мелкодисперсных взвешенных веществ, например, частиц плавающего активного ила и/или неокисленных соединений, а также стадию обеззараживания УФ-излучением или гипохлоритом натрия. Выбор способа обеззараживания во многом будет зависеть от состояния воды, экономической целесообразности и способности предприятия: цветность воды исключает применение УФ-излучения из-за снижения эффективности проникновения лучей, а также из-за дорогостоящей эксплуатации и больших расходов электроэнергии [10].

Успешно реализованные мероприятия и рекомендации

В качестве успешно реализованных мероприятий исследуемой автором темы можно привести одно из ведущих экологически ответственных предприятий российской целлюлозно-бумажной промышленности ОАО «Монди Сыктывкарский ЛПК», которое расположено в столице Республики Коми. Предприятие применяет многоступенчатую поэтапную очистку сточных вод, при которой использует смешение хозяйственно-бытовых и своих производственных стоков, что дает возможность значительно снизить показатели загрязняющих веществ БПК и ХПК в выходной очищенной воде. При этом предприятие также очищает коммунальные стоки, попадающие от муниципальных потребителей, что позволяет избежать

отдельных коммунальных очистных сооружений и значительно снизить тарифы на оплату коммунальных услуг. Такой подход, безусловно, наделяет данное предприятие значительным конкурентным преимуществом по сравнению с подобными благодаря следованию принципам устойчивого развития, а также свидетельствует о его ответственности в области мероприятий по охране окружающей среды [11].

Помимо предприятий целлюлозно-бумажной промышленности, подобные мероприятия возможно внедрять в другие подобные предприятия легкой промышленности: текстильные, агропромышленные комплексы или пищевое производство.

Заключение

1. Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности оказывают негативное воздействие на экологические характеристики связанных с ними водных объектов, которые отражаются на экологической обстановке местности, где они расположены, а также на здоровье жителей ближайших населенных пунктов, т. к. являются крупнейшими потребителями ресурсов водного объекта и загрязнителями поверхностных вод легко- и трудноокисляемыми соединениями, образованными в процессе их производственной деятельности, имея множество источников образования загрязненных сточных вод, зависящих от определенных технологических операций.

2. В производственных стоках фабрик будут содержаться волокна целлюлозы, мелкие частицы бумаги, органика и минеральные составляющие, а также частицы клейких и подобных эмульсий. Цвет таких стоков может колебаться в широком диапазоне. Наконец, абсолютно все стоки фабрик целлюлозно-бумажной промышленности характеризуют специфический запах и

повышенная температура.

3. В качестве совершенствования методов биологической очистки загрязненных в ходе производства сточных вод было предложено их смешение с хозяйственно-бытовыми муниципальными стоками, прошедшими предварительную механическую очистку. Особенность данного способа позволяет увеличить эффективность окисляемости (разложе-

ния) загрязняющих органических компонентов под воздействием множества простейших микроорганизмов.

4. Приведен пример успешного применения метода, даны рекомендации всевозможного внедрения способа в различные виды производства (в текстильное, агропромышленное и пищевое).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воичишин, Г. Н.** Гигиеническая оценка среды обитания и состояния здоровья населения в районе размещения целлюлозно-бумажных предприятий Сокольского района Вологодской области: дис. ... канд. мед. наук: 14.00.07 / Г. Н. Воичишин. – Санкт-Петербург, 2004. – 175 л.
2. Очистка сточных вод. Экологические загрязнения. Технологические особенности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vo-da.ru/articles/stochnye-vody-cbk/ekologicheskie-zagryazneniya>. – Дата доступа: 01.10.2021.
3. **ИТС 1–2015.** Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200128661>. – Дата доступа: 01.10.2021.
4. **ГОСТ Р 56847–2015.** Процессы производства целлюлозы. Нормативы образования отходов [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200129485>. – Дата доступа: 01.10.2021.
5. Регион. Инжиниринг, проектирование, строительство. Проектирование очистных сооружений промышленных сточных вод [Электронный ресурс] // Очистка сточных вод в бумажной промышленности (ЦБК). – Режим доступа: <https://dc-region.ru/ochistka-stochnyh-vod-v-bumazhnoy-promyshlennosti-cbk>. – Дата доступа: 01.10.2021.
6. Waste-free technology of Chlorella sorokiniana microalgae biomass usage for lipids and sorbents production / N. A. Politaeva [et al.] // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya. – 2019. – № 61 (12). – P. 137–143.
7. НПО «АгроСтройСервис» [Электронный ресурс] // Биологические очистные сооружения. Методы очистки. – Режим доступа: <https://acs-nnov.ru/>. – Дата доступа: 01.10.2021.
8. Что такое аэротенк? Аэротенк (аэрация) – биохимическое окисление стоков [Электронный ресурс] // Автономные канализации и септики. – Режим доступа: <https://delfin.one/aerotenk/>. – Дата доступа: 01.10.2021.
9. Energy production from chlorella algae biomass under St. Petersburg climatic conditions / N. A. Politaeva [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – Vol. 53, № 11–12. – С. 801–805.
10. **МДК 3–02.2001.** Правила технической эксплуатации систем и сооружений коммунального водоснабжения и канализации [Электронный ресурс]: утв. приказом Госстроя РФ, 30.12.1999 г., № 168. – Режим доступа: <https://sudact.ru/law/mdk-3-022001-pravila-tekhnicheskoi-ekspluatatsii-sistem-i-pravila/razdel-3/3.5/aerotenki/>. – Дата доступа: 01.10.2021.
11. Экологический аудит состояния сточных вод ОАО «Монди Сыктывкарский ЛПК» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://knowledge.allbest.ru/ecology/2c0a65625b2bd68b5d43a88521216d37_0.html. – Дата доступа: 01.10.2021.

Статья сдана в редакцию 14 октября 2021 года

Владислав Владимирович Лихачев, магистрант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. E-mail: lihachev.vv@edu.spbstu.ru.

Vladislav Vladimirovich Likhachyov, MSc student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: lihachev.vv@edu.spbstu.ru.

ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1(74) 2022

Ответственный за выпуск

И. В. Брискина

Оформление обложки

В. П. Бабичева

Дизайн и компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Адрес редакции: пр-т Мира, 43, Белорусско-Российский университет, корп. 1, комн. 332, 212022, г. Могилев. Телефон: 71-30-54, e-mail: bru@bru.by.

Журнал «Вестник Белорусско-Российского университета» зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1240 от 08.02.2010.

Подписано в печать 04.03.2022. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 15,71. Уч.-изд. л. 8,68. Тираж 100 экз. Заказ 1450.

Отпечатано в унитарном полиграфическом коммунальном предприятии «Могилевская областная укрупненная типография имени Спиридона Соболя». ЛП 02330/23 от 30.12.2013. Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев.