

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ПОВОЛЖЬЯ

№8 2019

Направления:

**05.13.01 – СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ (технические науки)**

**05.13.06 – АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ
(технические науки)**

**05.13.11 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (физико-математические науки)**

**05.13.11 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (технические науки)**

**05.13.18 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫЕ
МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ (технические науки)**

**05.13.19 – МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ,
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(физико-математические науки)**

**Казань
2019**

УДК 60

ББК 30-1

Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №8 2019г. – Казань: ООО «Рашин Сайнс», 2019. – 90 с.

ISSN 2079-5920

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (реестровая запись от 08.05.2019 серия ПИ № ФС 77 -75732).

Журнал размещен в открытом бесплатном доступе на сайте www.ntvp.ru, и в Научной электронной библиотеке (участвует в программе по формированию РИНЦ).

Журнал включен ВАК РФ в перечень научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» № E12025.

Главный редактор Р.Х. Шагимуллин

Редакционная коллегия

*С.В. Анаников – д.т.н., проф.; Т.Р. Дебердеев – д.т.н., проф.; Б.Н. Иванов – д.т.н., проф.;
В.А. Жихарев – д.ф.-м.н., проф.; В.С. Минкин – д.х.н., проф.; А.Н. Николаев – д.т.н., проф.;
В.К. Половняк – д.х.н., проф.; П.П. Суханов – д.х.н., проф.; В.Ф. Тарасов – д.ф.-м.н., проф.;
Х.Э. Харлампиди – д.х.н., проф.*

В журнале отражены материалы по теории и практике технических, физико-математических и химических наук.

Материалы журнала будут полезны преподавателям, научным работникам, специалистам научных предприятий, организаций и учреждений, а также аспирантам, магистрантам и студентам.

УДК 60

ББК 30-1

ISSN 2079-5920

© Рашин Сайнс, 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>С.В. Анаников, А.Г. Кутузов, И.В. Логинова</i> ОБОБЩЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ КОНЕЧНОГО ЦИЛИНДРА. СООБЩЕНИЕ 2. НЕКОТОРЫЕ ЧАСТНЫЕ РЕШЕНИЯ	7
<i>Б.Н. Иванов, Р.Н. Костромин, Р.Х. Шагимуллин, В.С. Минкин</i> АЛГОРИТМ РАЦИОНАЛЬНОГО ВНУТРИПЛАСТОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ И БИТУМИНОЗНЫХ НЕФТЕЙ. СООБЩЕНИЕ 1. ОБОСНОВАНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ	12

05.13.01 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<i>И.М. Ажмухамедов, Е.В. Мельников</i> ОЦЕНКА ХЭМИНГОВОГО РАССТОЯНИЯ СЕГМЕНТНЫХ КОДОВ МАКСИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ	18
<i>С.А. Вологжанина, А.П. Петкова, А.Ф. Иголкин, А.А. Перегудов</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	23
<i>А.А. Емельянов, В.В. Малышев, А.В. Старков, Л.А. Гришанцева, К.И. Зубкова, Зай Яр Вин</i> АНАЛИЗ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ЗАДАЧЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЗЗ	28
<i>А.А. Емельянов, В.В. Малышев, А.В. Старков, Л.А. Гришанцева, К.И. Зубкова, Зай Яр Вин</i> РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЗЗ	32
<i>С.И. Лаптев, С.Н. Антропов, А.П. Буйносов</i> РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ТЕЛЕЖКИ ГАЗОТУРБОВОЗА КАК СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМОЙ СИСТЕМЫ	37

05.13.06 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

<i>С.А. Канаев, А.С. Конькова, М.Ю. Молозина, О.В. Москаленко, А.В. Торчинская</i> ЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК СТЕНДА КАЛИБРОВКИ И ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ПОРТАТИВНЫХ ТЕРМОАНАЛОГОВ СПИРОГРАФОВ И СПИРОАНАЛИЗАТОРОВ	41
<i>С.В. Леонтьев, П.Е. Бессонова</i> ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СТРОИТЕЛЬНОГО КОНГЛОМЕРАТА МЕТОДОМ ДВУХФАКТОРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА	45
<i>В.А. Шаманов, М.А. Горкунова</i> ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЪЮНКТУРЫ РЫНКА	49

05.13.18 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

<i>Е.В. Акиндинова, В.Е. Чернов, О.В. Зеткина</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РАСЧЕТАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХАТОМНЫХ НЕПОЛЯРНЫХ МОЛЕКУЛ	53
<i>И.Р. Бадертдинов, И.Л. Кузнецов, Л.С. Сабитов, Л.Ш. Ахтямова</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ УПРУГО ОПЁРТЫХ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО СЕЧЕНИЯ РЕШЕТОЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ БАШЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ	59

<i>И.Н. Бояринова, М.Р. Бекмансуров</i> МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	62
<i>А.П. Буйносов, К.А. Вахрушев</i> ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ КОЛЕИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ НА УСЛОВИЯ СВОБОДНОГО ВПИСЫВАНИЯ ТЕЛЕЖЕК ЛОКОМОТИВОВ	65
<i>Г.М. Гузаиров, Н.А. Мунасыпов</i> ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ НА ГРУППЕ ЛОРЕНЦА И КОМПЛЕКСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОНТОРОВИЧА-ЛЕБЕДЕВА	69
<i>А.О. Казакова</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОДНОРОДНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ТЕЛЕ МНОГОСВЯЗНОГО СЕЧЕНИЯ	73
<i>Т.К. Ксенофонтова</i> РАСЧЕТ ПОДЗЕМНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБ С УЧЕТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПО МЕТОДУ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ (МФА)	77
<i>А.С. Титовцев</i> ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА В СИСТЕМАХ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ ПОТОКОВ	80
АННОТАЦИИ	83

THE RELEASE MAINTENANCE

S.V. Ananikov, A.G. Kutuzov, I.V. Loginova COMMON SOLUTION OF HEAT CONDUCTION TASK FOR END CYLINDER. COMMUNICATION 2. SOME PARTICULAR SOLUTION	7
B.N. Ivanov, R.N. Kostromin, R.Kh. Shagimullin, V.S. Minkin ALGORITHM FOR RATIONAL INLAST PLASTIC TRANSFORMATION OF HIGH-VISCOUS AND BITUMINOUS OILS. MESSAGE 1. JUSTIFICATION AND STATEMENT OF TASKS	12

05.13.01 — TECHNICAL SCIENCES — SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND INFORMATION PROCESSING

I.M. Azhmukhamedov, E.V. Melnikov EVALUATION OF THE HEMING DISTANCE OF SEGMENT CODES OF THE MAXIMUM LENGTH	18
S.A. Vologzhanina, A.P. Petkova, A.F. Igolkin, A.A. Peregudov COMPARATIVE ANALYSIS OF DATA IN ASSESSMENT OF PROPERTIES OF MATERIALS OF WELDED CONNECTIONS	23
A.A. Emel'yanov, V.V. Malyshev, A.V. Starkov, L.A. Grishantseva, K.I. Zubkova, Zay Yar Win ANALYSIS AND GENERATION OF PERFORMANCE INDICATORS IN THE PROBLEM OF FLOW DISTRIBUTION TARGET INFORMATION IN THE OPERATION OF ERS DATA PROCESSING	28
A.A. Emel'yanov, V.V. Malyshev, A.V. Starkov, L.A. Grishantseva, K.I. Zubkova, Zay Yar Win MATHEMATICAL MODEL OF FUNCTIONING OF THE GROUND SEGMENT IN DISTRIBUTED REMOTE OF ERS DATA PROCESSING	32
S.I. Laptev, S.N. Antropov, A.P. Buinosov STRENGTH CALCULATION OF BOGIE LOCOMOTIVE AS STATICALLY DETERMINATE SYSTEM	37

05.13.06 — TECHNICAL SCIENCES — AUTOMATION AND MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTION

S.A. Kanaev, A.S. Konkova, M.U. Molozina, O.V. Moskalenko, A.V. Torchinskaya ELECTRONIC UNIT OF STAND OF CALIBRATION AND THERMAL COMPENSATION OF PORTABLE THERMOANEMOMETRIC SPYROGRAPHERS AND SPYROANALYZERS	41
S.V. Leontev, P.E. Bessonova OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF CONSTRUCTION CONGLOMERATE BY THE TWO-FACTORY EXPERIMENTAL PLANNING METHOD	45
V.A. Shamanov, M.A. Gorkunova DECISION SUPPORT FOR AERATED CONCRETE QUALITY CONTROL IN CHANGING MARKET CONDITIONS	49

05.13.18 — TECHNICAL SCIENCES — MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

E.V. Akindinova, V.E. Chernov, O.V. Zetkina MATHEMATICAL MODELING IN THE CALCULATION OF THE ELECTROMAG-NETIC CHARACTERISTICS OF DIATOMIC NON-POLAR MOLECULES	53
I.R. Badretdinov, I.L. Kuznetsov, L.S. Sabitov, L.S. Ahtyamova DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR CALCULATION OF THE STABILITY OF ELASTICALLY SUPPORTED THIN-WALLED BEAMS OF OPEN CROSS-SECTION IN LATTICE STRUCTURES TOWER STRUCTURES	59
I.N. Boyarshinova, M.R. Bekmansurov METHODS OF OPTIMAL DESIGN OF FRAME STRUCTURES	62
A.P. Buinosov, K.A. Vakhrushev INFLUENCE OF GAUGE WIDTH TRAIN TRACKS TO THE TERMS OF FREE FIT TRUCKS LOCOMOTIVES	65

<i>G.M. Guzairov, N.A. Munasypov</i> THE REPRESENTATIONS OF THE LORENTZ GROUP AND DECOMPOSITION OF FUNCTIONS ON BY BESSELS FUNCTIONS	69
<i>A.O. Kazakova</i> NUMERICAL MODELLING OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A HOMOGENEOUS CYLINDRICAL BODY OF MULTIPLY-CONNECTED CROSS-SECTION	73
<i>T.K. Ksenofontova</i> CALCULATION OF UNDERGROUND CONCRETE PIPES WITH CONSIDERATION OF CYLINDRICAL ANISOTROPY BY THE METHOD OF FUNCTIONAL APPROXIMATION OF THE ESTIMATED PARAMETERS (MFAEP)	77
<i>A.S. Titovtsev</i> STUDY OF NON-STATIONARY MODE IN QUEUEING SYSTEMS MULTICOMPONENT FLOWS	80
ABSTRACTS	83

05.13.18

**С.В. Анаников д-р техн. наук, А.Г. Кутузов д-р техн. наук,
И.В. Логинова канд. хим. наук**

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Кафедра химической кибернетики,
Казань, ananikovsv@rambler.ru

ОБОБЩЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ КОНЕЧНОГО ЦИЛИНДРА. СООБЩЕНИЕ 2. НЕКОТОРЫЕ ЧАСТНЫЕ РЕШЕНИЯ

В работе приводится ряд частных решений, вытекающих из обобщенного решения задачи теплопроводности для конечного цилиндра при различных сочетаниях зависимостей начальных и граничных условий от цилиндрических координат и времени - r, z, τ . Эти решения переходят в известные классические решения более простых задач.

Ключевые слова: *теплопроводность, граничные условия, тепловой поток, сочетание решений.*

Ранее было получено (сообщение 1) точное решение задачи о теплопроводности для конечного цилиндра при самых общих начальных и граничных условиях.

В настоящей работе это решение конкретизируется для ряда более простых задач. Ниже представлены некоторые частные решения, полученные при замене исходных функций вида $f(r, z)$, $q(r, \tau)$, $T_{ct}(z, \tau)$ другими более простыми сочетаниями f , q, T_{ct} при их вариантной зависимости от r, z, τ .

1. $T_0 = \text{const}, q = \text{const}, T_{ct} = \text{const}.$

$$T(r, z, \tau) = T_{ct} - (T_{ct} - T_0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{-\frac{a^2 \mu_m^2 \tau}{R^2}} +$$

$$+ \frac{qR^2}{\lambda l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m^3 J_1(\mu_m)} \left(1 - e^{-\frac{a^2 \mu_m^2 \tau}{R^2}}\right) +$$

$$+ \frac{2qR^2 l}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)(-1)^n}{\mu_m J_1(\mu_m)} \frac{\cos \frac{\pi n z}{l}}{(\pi^2 n^2 R^2 + \mu_m^2 l)} \left[1 - e^{-a^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2}\right) \tau}\right].$$

2. $T_0 = \text{const}, q(\tau), T_{ct} = \text{const}.$

$$T(r, z, \tau) = T_{ct} - (T_{ct} - T_0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{-\frac{a^2 \mu_m^2 \tau}{R^2}} +$$

$$+ \frac{a^2}{\lambda l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} q(t) e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt +$$

$$+ \frac{2a^2}{\lambda l} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} \int_0^{\tau} q(t) e^{-a^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2}\right)(\tau-t)} dt.$$

3. $f(r, z), q(\tau), T_{ct}(\tau).$

$$T(r, z, \tau) = T_{ct}(\tau) - \frac{1}{lR^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{J_1^2(\mu_m)} e^{-\frac{a^2 \mu_m^2 \tau}{R^2}} \times$$

$$\times \int_0^R \left\{ \int_0^l [f(r, z) - T_{ct}(0)] dz \right\} r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr -$$

$$\begin{aligned}
& - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} \frac{\partial T_{CT}(t)}{\partial t} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \frac{a^2}{\lambda l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} q(t) e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \\
& + \frac{2}{lR^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{J_1^2(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} e^{-a^2(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2})\tau} \times \\
& \times \int_0^R \left\{ \int_0^l [f(r, z) - T_{CT}(z, 0)] \cos \frac{\pi n z}{l} dz \right\} r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr + \\
& + \frac{2a^2}{\lambda l} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{\mu_m J_1(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} \int_0^{\tau} q(t) e^{-a^2(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2})(\tau-t)} dt.
\end{aligned}$$

Это соотношение можно упростить, если выполнить в нём преобразование

$$\begin{aligned}
& \int_0^R \left\{ \int_0^l [f(r, z) - T_{CT}(0)] \cos \frac{\pi n z}{l} dz \right\} r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr = \\
& \int_0^R \left[\int_0^l f(r, z) \cos \frac{\pi n z}{l} dz \right] r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr - T_{CT}(0) \int_0^R \left[\int_0^l \cos \frac{\pi n z}{l} dz \right] r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr = \\
& = \int_0^R \left[\int_0^l f(r, z) \cos \frac{\pi n z}{l} dz \right] r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr,
\end{aligned}$$

так как $T_{CT}(0) = const$.

Тогда будет

$$\begin{aligned}
T(r, z, \tau) &= T_{CT}(\tau) - \frac{1}{lR^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{J_1^2(\mu_m)} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} \times \\
& \times \int_0^R \left\{ \int_0^l [f(r, z) - T_{CT}(0)] dz \right\} r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} \frac{\partial T_{CT}(t)}{\partial t} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \\
& + \frac{a^2}{\lambda l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} q(t) e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \frac{2}{lR^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{J_1^2(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} e^{-a^2(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2})\tau} \times \\
& \times \int_0^R \left[\int_0^l f(r, z) \cos \frac{\pi n z}{l} dz \right] r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr + \\
& + \frac{2a^2}{\lambda l} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{\mu_m J_1(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} \int_0^{\tau} q(t) e^{-a^2(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2})(\tau-t)} dt.
\end{aligned}$$

Этот вариант можно конкретизировать на более простые случаи, если $f(r, z)$ заменить в 3. соответственно на $T_0 = const$, $f(r)$ и $f(z)$. При этом получаются три варианта решений.

4. $T_0 = const, q(\tau), T_{CT}(\tau)$.

$$\begin{aligned}
T(r, z, \tau) &= T_{CT}(\tau) + [T_0 - T_{CT}(0)] \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} - \\
& - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} \frac{\partial T_{CT}(t)}{\partial t} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \frac{a^2}{\lambda l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} q(t) e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \\
& + \frac{2a^2}{\lambda l} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0(\mu_m \frac{r}{R})}{\mu_m J_1(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} \int_0^{\tau} q(t) e^{-a^2(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2})(\tau-t)} dt.
\end{aligned}$$

5. $f(r), q(\tau), T_{CT}(\tau)$.

$$\begin{aligned} T(r, z, \tau) = & T_{CT}(\tau) + \frac{1}{R^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{J_1^2(\mu_m)} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} \int_0^R f(r) r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr - \\ & - T_{CT}(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} \frac{\partial T_{CT}(t)}{\partial t} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \\ & + \frac{a^2}{\lambda l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} q(t) e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \\ & + \frac{2a^2}{\lambda l} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} \int_0^{\tau} q(t) e^{-a^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2}\right)(\tau-t)} dt. \end{aligned}$$

6. $f(z), q(\tau), T_{CT}(\tau)$.

$$\begin{aligned} T(r, z, \tau) = & T_{CT}(\tau) + \frac{1}{l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} \int_0^l f(z) dz - \\ & - T_{CT}(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} \frac{\partial T_{CT}(t)}{\partial t} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \\ & + \frac{a^2}{\lambda l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} q(t) e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \\ & + \frac{2a^2}{\lambda l} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} \int_0^{\tau} q(t) e^{-a^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2}\right)(\tau-t)} dt. \end{aligned}$$

7. $f(r), q(r, \tau), T_{CT}(\tau)$.

$$\begin{aligned} T(r, z, \tau) = & T_{CT}(\tau) + \frac{1}{R^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{J_1^2(\mu_m)} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} \int_0^R f(r) r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr - \\ & - T_{CT}(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} \frac{\partial T_{CT}(t)}{\partial t} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \\ & + \frac{a^2}{\lambda R^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{J_1^2(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} \int_0^{\tau} \left[\int_0^R q(r, t) r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr \right] e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \\ & + \frac{2a^2}{\lambda R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^n J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{J_1^2(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} \times \\ & \times \int_0^{\tau} \left[\int_0^R q(r, t) r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr \right] e^{-a^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2}\right)(\tau-t)} dt. \end{aligned}$$

8. $T_0 = const, q(r, \tau), T_{CT}(\tau)$.

$$\begin{aligned} T(r, z, \tau) = & T_{CT}(\tau) + [T_0 - T_{CT}(0)] \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} - \\ & - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} \frac{\partial T_{CT}(t)}{\partial t} e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \\ & + \frac{a^2}{\lambda R^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{J_1^2(\mu_m)} \int_0^{\tau} \left[\int_0^R q(r, t) r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr \right] e^{\frac{-a^2 \mu_m^2}{R^2}(\tau-t)} dt + \end{aligned}$$

$$+ \frac{2a^2}{\lambda l R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{J_1^2(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} \times \\ \times \int_0^{\tau} \left[\int_0^R q(r, t) r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr \right] e^{-a^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2} \right) (\tau - t)} dt.$$

9. $T_0 = \text{const}, q(\tau), T_{\text{CT}}(\tau)$

$$T(r, z, \tau) = T_{\text{CT}}(\tau) + [T_0 - T_{\text{CT}}(0)] \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} - \\ - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} \frac{\partial T_{\text{CT}}(t)}{\partial t} e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} (\tau - t)} dt + \frac{a^2}{\lambda l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} q(t) e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} (\tau - t)} dt + \\ + \frac{2a^2}{\lambda l} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} \int_0^{\tau} q(t) e^{-a^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2} \right) (\tau - t)} dt.$$

10. $T_0 = \text{const}, q = \text{const}, T_{\text{CT}}(\tau)$.

$$T(r, z, \tau) = T_{\text{CT}}(\tau) + [T_0 - T_{\text{CT}}(0)] \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} - \\ - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} \frac{\partial T_{\text{CT}}(t)}{\partial t} e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} (\tau - t)} dt + \frac{q R^2}{\lambda l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m^3 J_1(\mu_m)} \left(1 - e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} \right) + \\ + \frac{2q R^2 l}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m) (\pi^2 n^2 R^2 + \mu_m^2 l^2)} \cos \frac{\pi n z}{l} \left[1 - e^{-a^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2} \right) \tau} \right].$$

11. $T_0 = \text{const}, q = \text{const}, T_{\text{CT}} = \text{const}$.

$$T(r, z, \tau) = T_{\text{CT}} + (T_0 - T_{\text{CT}}) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} + \\ + \frac{q R^2}{\lambda l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m^3 J_1(\mu_m)} \left(1 - e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} \right) + \\ + \frac{2q R^2 l}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m) (\pi^2 n^2 R^2 + \mu_m^2 l^2)} \cos \frac{\pi n z}{l} \left[1 - e^{-a^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2} \right) \tau} \right].$$

12. $T_0 = \text{const}, q(r, \tau), T_{\text{CT}} = \text{const}$.

$$T(r, z, \tau) = T_{\text{CT}} + (T_0 - T_{\text{CT}}) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} + \\ + \frac{a^2}{\lambda l R^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{J_1^2(\mu_m)} \int_0^{\tau} \left[\int_0^R q(r, t) r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr \right] e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} (\tau - t)} dt + \\ + \frac{2a^2}{\lambda l R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{J_1^2(\mu_m)} \cos \frac{\pi n z}{l} \times \\ \times \int_0^{\tau} \left[\int_0^R q(r, t) r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr \right] e^{-a^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2} \right) (\tau - t)} dt.$$

13. $T_0 = \text{const}, q(r), T_{\text{CT}} = \text{const}$.

$$T(r, z, \tau) = T_{\text{CT}} + (T_0 - T_{\text{CT}}) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{\lambda l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m^2 J_1^2(\mu_m)} \left(1 - e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau}\right) \int_0^R q(r) r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr + \\
& + \frac{2l}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{J_1^2(\mu_m) (\pi^2 n^2 R^2 + \mu_m^2 l^2)} \cos \frac{\pi n z}{l} \times \left[1 - e^{-a^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2}\right) \tau}\right] \int_0^R q(r) r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr.
\end{aligned}$$

Из 8. вытекает:

$$14. \quad T_0 = \text{const}, q(r), T_{\text{CT}}(\tau).$$

$$\begin{aligned}
T(r, z, \tau) = & T_{\text{CT}}(\tau) + [T_0 - T_{\text{CT}}(0)] \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau} - \\
& - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \int_0^{\tau} \frac{\partial T_{\text{CT}}(t)}{\partial t} e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} (\tau-t)} dt + \\
& + \frac{1}{\lambda l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{\mu_m^2 J_1^2(\mu_m)} \left(1 - e^{-\frac{a^2 \mu_m^2}{R^2} \tau}\right) \int_0^R q(r) r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr + \\
& + \frac{2l}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right)}{J_1^2(\mu_m) (\pi^2 n^2 R^2 + \mu_m^2 l^2)} \cos \frac{\pi n z}{l} \left[1 - e^{-a^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{l^2} + \frac{\mu_m^2}{R^2}\right) \tau}\right] \times \\
& \times \int_0^R q(r) r J_0\left(\mu_m \frac{r}{R}\right) dr.
\end{aligned}$$

Следует отметить, что при вычислении интегралов были использованы справочные материалы из [1, 2].

Представленные варианты не исчерпывают всех возможных сочетаний начальных и граничных условий, которые могут быть получены из обобщенного решения. Количество таких сочетаний может быть подсчитано методами элементарной математики и охватывает несколько десятков вариантов.

Список литературы

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
2. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г.Б. Двайт. – М.: Наука, 1964. – 228 с.

¹Б.Н. Иванов д-р техн. наук, ²Р.Н. Костромин канд. техн. наук,
³Р.Х. Шагимуллин канд. техн. наук, ⁴В.С. Минкин д-р хим. наук

¹Казанский научно-исследовательский технологический университет,
кафедра общей химической технологии,
²ООО «Миррико менеджмент»,

³Главный редактор журнала «Научно-технический вестник Поволжья»,

⁴Казанский научно-исследовательский технологический университет,
кафедра физики,

Казань, ivanovbn@rambler.ru, kostromin-rn@rambler.ru,
shagimullin@ntvp.ru, yerus@yandex.ru

АЛГОРИТМ РАЦИОНАЛЬНОГО ВНУТРИПЛАСТОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ И БИТУМИНОЗНЫХ НЕФТЕЙ. СООБЩЕНИЕ 1. ОБОСНОВАНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Запасы тяжелых и битуминозных нефтей по отношению к легко извлекаемым запасам непрерывно возрастают, а добыча таких нефтей сопровождается большими техническими трудностями и экономическими затратами. В мировой практике идет непрерывный поиск новых и совершенствование известных методов их добычи. Одними из наиболее эффективных технологий является газовый, паровой и парожидкостной варианты нефтедобычи заключающиеся во внутрипластовой термической и термальной обработках. В последнее время предлагается использовать дополнительный ввод каталитических систем. В данной статье авторами рассматриваются теоретические основы применения приемов внутрипластового преобразования высоковязких и битумных нефтей с использованием каталитических флюидов в равновесных и критических состояниях.

Ключевые слова: тяжелые и битуминозные нефти, вещественно-волновая природа, равновесное и критическое состояния.

Запасы тяжелых и битуминозных нефтей в Республике Татарстан оцениваются от 2 до 11 млрд.т. При этом их доля по отношению к, так называемым, легко извлекаемым запасам непрерывно возрастает, а добыча сопровождается большими техническими трудностями и экономическими затратами, что обусловлено их природой и условиями залегания. То есть, в первую очередь, генетическими и фациально-литологическими факторами. Все же, в мировой практике идет непрерывный поиск новых и совершенствование известных методов их добычи.

Одними из наиболее эффективных на настоящий момент технологий является газовый, паровой и парожидкостной варианты нефтедобычи. Суть этих методов заключается в, преимущественно эмпирически подобранных, внутрипластовой термической и термальной обработках. В последние десятилетия исследователи предлагают использовать дополнительный ввод каталитических систем¹.

Однако, несмотря на определенные достижения, такой подход, несколько упрощая и увеличивая объем добычи нефти, не может, по нашему мнению, кардинально решить проблему, т.к. не ведет к состоянию всеобщего подобия и экстремального равновесия.

Нам представляется более рациональным глобальное решение проблем за счет перевода искоемых систем (по крайней мере, их ключевых ингредиентов) в универсальное для них равновесные состояния (следовательно, с универсальными общими свойствами).

В принципе, похожий подход пытались применять многие столетия назад первые химики (алхимики), сформулировавшие правило: *подобное растворяется в подобном*. Последнее

¹ В частности, специалисты российской фирмы «РИТЭК». Мы подобный подход предлагаем уже около 30 лет [1, 2].

легко трансформировать в следующее положение: *подобное взаимодействует с подобным*. Однако продвижение познания в этом направлении замедлилось и, по сути, повернулось на решение частных задач. Нами же уже достаточно давно [1-11] предлагается вернуться к использованию общей основы всех (и природных и техногенных) материальных образований и их взаимодействий. Тем более, что, по нашему твердому убеждению, природа не только создает важнейшие объекты использования или исследования человечеством, но и подсказывает рациональные методы и технологии.

Важнейшим открытием, подтверждающим возможность вышеизложенного, является обоснование великим М.В. Ломоносовым корпускулярно-волновой природы материальных веществ и их взаимодействий.

В современном мире нам представляется более удобным и универсальным наименование [9-12]: *вещественно-волновая природа* (ВВП) систем и их взаимодействий (в т.ч., и социума).

ВВП (а, следовательно, и подобие) – коренное свойство всех материальных образований (и вещества, и поля) и их взаимодействий. Открытие М.В. Ломоносова подтверждает и обосновывает аксиоматический¹ закон о двойственности мира: действие и оценка действия²; ассоциация $\leftrightarrow$ диссоциация материальных образований и их взаимодействий.

Роль ассоциации $\leftrightarrow$ диссоциации, являющейся одной из важнейших характеристик материальных образований, особенно важна при протекании процессов на наноуровне, сопровождающиеся одновременным проявлением дискретности и сплошности [10, 12-19].

Коренная общности физических и химических взаимодействий – единый двоичный носитель движения (волна-вещество), а коренное отличие – в уровне носителя волны, направлении и скорости движения (с влиянием, если они наличествуют, химического и физического резонансов) [20-22].

Исходные положения и результаты наших исследований в этом направлении позволили сформулировать закон о 4-й материальном виде проявления закона Сохранения – закон о формах существования и взаимных переходах материальных образований [19].

По убеждению авторов настоящей статьи, указанные различия и предопределяют то обстоятельство, что одни процессы происходят с изменением природы материальных образований (*химические взаимодействия*), а другие нет (*физические взаимодействия*).

Следовательно, в принципе допустимо, что при определенных условиях (достижение которых вполне реально), стирается грань между физическими и химическими явлениями³.

Такую возможность, по нашему мнению, доказал Э. Резерфорд, получивший «бомбардировкой» радиационным облучением из ядер азота ядра кислорода еще в начале 20-го века (за что получил Нобелевскую премию по химии).

Вышеизложенное позволяет нам определять нанопроцессы, как процессы между «псевдоэлементарными» частицами с размерами и связями между собой $< 0,1$ нм. При этом их коренной характеристикой, кроме ВВП, наличия пограничной области полного подобия, одновременного проявления дискретности и сплошности, является *стирание грани* между физическим и химическим взаимодействиями.

В этой связи уместно вспомнить известное высказывание В.И. Ленина, что «электрон так же неисчерпаем как атом». Проведенная нами качественно-количественная оценка этого справедливого утверждения показала, что электрон, обладающий отрицательным зарядом⁴ (т.е. избыточным нескомпенсированным количеством движения) состоит минимумом из 5 более мелких частиц [11, 17].

Выразим массы электрона ($m_{эл}$), протона ($m_{пр}$), нейтрона (m_n) следующими соотношениями:

¹ Т.е. закон, подтверждаемый практической и научной деятельностью Человечества.

² Особенно важно при процессе познания.

³ Основной вопрос – в длительности таких состояний.

⁴ В нашем понимании «заряд» – нескомпенсированные на поверхностях количества вещества и движения микрочастиц. В первую очередь, на поверхностях ассоциатов разного уровня.

$$m_{эл} = m_k \cdot x \quad (1)$$

$$m_{пр} = y \cdot m_k \quad (2_1)$$

$$m_{пр} = l \cdot m_{эл} \quad (2_2)$$

$$m_{пр} = l \cdot x \cdot m_k \quad (2_3)$$

$$m_n = \varphi \cdot m_k \quad (3_1)$$

$$m_n = m_{пр} + z \cdot m_k \quad (3_2)$$

где: m_k – масса некой k -той составляющей электрон частицы; x – число этих частиц в электроне; y – число k -частиц в протоне; l – справочная величина (≈ 1836); z – число k -частиц «нейтрализующих протон»; φ – число k -частиц в нейтроне ($\varphi=y+z$).

В результате достаточно элементарных преобразований получим систему базовых уравнений (4) и краевых условий (5):

$$\left\{ \begin{array}{l} m_k = \frac{m_{пр}}{y} \\ m_k = \frac{m_{эл}}{x} \\ m_k = \frac{\Delta m_l}{z} = \frac{m_n - m_{пр}}{z} \end{array} \right. \quad (4);$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = 1, 3, 5, 7, \dots; \\ y \gg 1 \text{ (нечетное число)}; \\ z = \text{нечетное число} > 1; \\ \varphi = y+z - \text{четное число} \gg 2. \end{array} \right. \quad (5);$$

При решении систем (4) и (5) получено достаточно корректное значение $x=5$. Рассчитанная масса протона составляет $17221,6 \cdot 10^{-31}$, справочное значение – $16725,2 \cdot 10^{-31}$ кг; невязка между рассчитанной и справочной массой составляет $\sim 3\%$ относительных.

Эта цифра совпадает с годовым колебанием частоты гравитационного поля Солнца, в котором находится Земля. Возможно асимметрия и величина амплитуд и частот гравитационных колебаний (микрочастиц) и обуславливает неполярные, полярные и химические взаимодействия.

В этой связи целесообразно отметить, что Д.И. Менделеев Периодическую таблицу свойств веществ формировал по удельному весовому признаку относительно удельного веса водорода.

На практике нередко рациональнее оперировать более обобщенными характеристиками, не выходящими, при этом, за границы классической термодинамики.

Авторам настоящей статьи представляется целесообразным использовать понятия и характеристики, близкие к, так называемым, критическим состояниям, точкам и областям с учетом выше представленных авторских аксиоматических положений.

Критическое состояние (в точке, поверхности, области), по нашему мнению, – особый случай равновесия.

Обычное не экстремальное равновесие – это равновесие тех или иных видов материальных образований в не экстремальных для них условиях (т.е. материальное образование, практически, не меняет свою природу).

Критическое равновесие – это экстремальное равновесие, при котором материальное образование находится в пограничном состоянии между старым и новым качеством.

Именно поэтому в таком состоянии проявляются одновременно и уникальные и универсальные свойства. Следовательно, необходимо исследовать и создавать такие свойства.

Использование критического состояния в процессах растворения и экстракции осуществляется уже ~ 1,5 веков. Однако строгого теоретического обоснования важнейшего практического положения [23], что растворимость веществ различной природы в сверхкритических флюидах имеет общий характер для твердых и жидких веществ, нет до настоящего времени.

Даже в одной из лучших книг по данной тематике [23] первых десятилетий 21-го века отмечается, что вопросы «надежной экстраполяции и прогнозирования» остаются открытыми. Давая фазовую диаграмму «Р-Т» для CO_2 (рис. 1) авторы не указывают обязательно образующиеся, по нашему мнению, при данных условиях переходных (деформационных) областей. Более того, вообще не говорится о пространственных границах и уровнях структурности ингредиентов рассматриваемой системы.

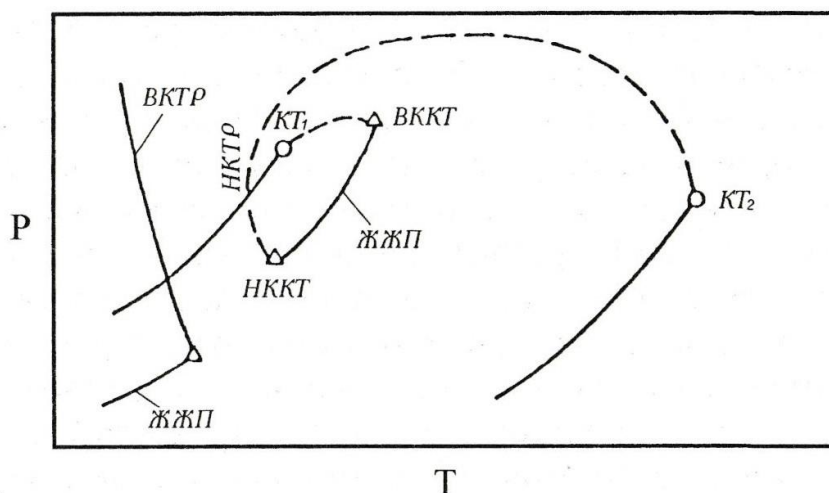


Рис. 1. Р-Т фазовая диаграмма чистого диоксида углерода (CO_2) для различных изохор (пунктирными линиями обозначена граница сверхкритической области)

Представляется целесообразным приведение еще одной фазовой диаграммы «Р-Т» из [23] (рис. 2), поскольку многие нефти и нефтесодержащие системы имеют аналогию с полимерами и их можно отнести к природным олигомерам.

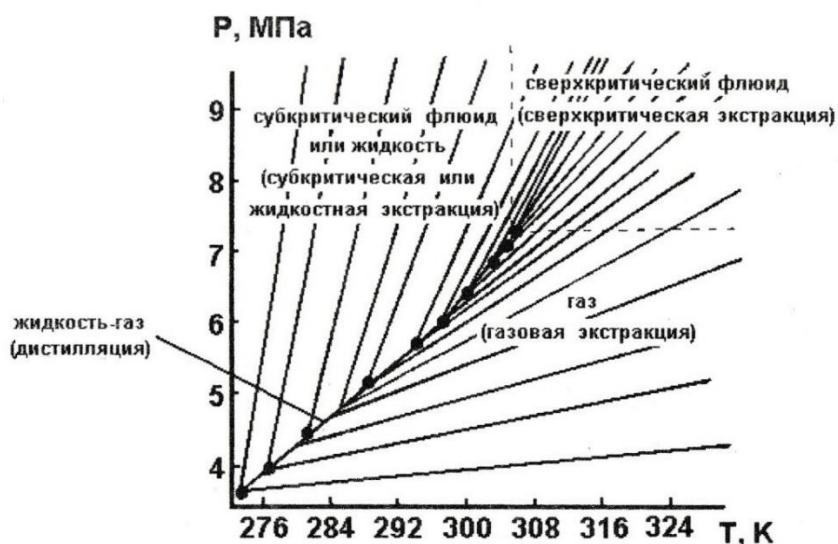


Рис. 2. Диаграмма «Р-Т» для смесей полимер-растворитель, КТ₁ – критическая точка чистого растворителя; КТ₂ – критическая точка чистого полимера (это достаточно условно, т.к. полимер может еще до достижения критической точки частично термически разложиться)

Пунктиром обозначены критические линии смесей: ветвь, начинающаяся в точке KT_1 , заканчивается в верхней критической конечной точке (ВККТ). При температурах ниже KT_1 появляется область ЖЖП, также заканчивающаяся в ВККТ.

Эта иллюстрация имеет уже большой физический смысл. Однако опять не разграничиваются параметры состояния и пространственные параметры критических точек, линий, поверхностей и областей. В то же время и «линии», и «поверхности», и «области» представляют собой совокупности ассоциатов, в свою очередь являющихся совокупностью «псевдоэлементарных» частиц, имеющих какую-то массу и пространственные размеры.

Вообще представляется рациональным, по нашему мнению, рассматривать критическую точку, как псевдоэлементарное материальное образование имеющее объем, находящееся в состоянии экстремального равновесия.

Причем, пространственные параметры находятся в достаточно большом для своей величины колебании в следствие локальных или глобального резонансов.

Таким образом, чем сложнее система, тем важнее исследовать ее как совокупность материальных точек с критическими размерами (доли нм) и параметрами состояния, обеспечивающими перевод искомого материального образования (или их совокупности) в область экстремального равновесия, характеризующуюся состоянием со стертыми гранями между физическими и химическими процессами (пограничное состояние).

Авторы настоящей статьи считают назревшей необходимостью, с целью рационализации способов добычи высоковязких и битумных нефтей, разработку, на базе вышеизложенных подходов, основных приемов их внутрипластового преобразования в пограничное состояние с использованием каталитических флюидов с достаточной степенью подобия.

Список литературы

1. *Иванов, Б.Н.* Качественный подход к оценке реакционной способности материальных образований. Сообщение 1-3 //М.: ВИНТИ.-1987. - №2336. – В87; ВИНТИ.- 1987. - №2337. – В87; ВИНТИ.- 1987. -№2339. – В87.
2. *Иванов Б.Н., Барабанов В.П., Минкин В.С., Старшов И.М.* Энергетическая модель процессов в каналах нефтеносного пласта / / Нефтяное хозяйство. – 1989. – № 12. – С.69. – Деп. ВНИИОЭНГ.
3. *Иванов Б.Н.* Энергетическая оценка способности некоторых классов органических соединений и комплексообразованию с мочевиной. Сообщение 1. // Интенсификация химических процессов переработки нефтяных компонентов. – Межвуз.сб.-Казань, 1989,- с.78-84.
4. Энерго-аналитический подход к поиску экологически чистых путей интенсификации химико-технологических процессов / Б.Н. Иванов, В.С. Минкин // Решение экологических проблем на предприятиях химической и нефтехимической промышленности. – Пленарные доклады Межреспублик. Научн.-техн. Конф. – Волгоград, 1989, – с. 45-70.
5. *Иванов Б.Н., Минкин В.С., Суханов А.П.* Энерго-аналитический поиск экологически чистых путей первичной обработки нефти // VII Международ. Нефтехим. Симпозиум стран СЭВ, сб. тез. докл. – Киев. – 1990, - с. 205.
6. *Иванов Б.Н., Минкин В.С., Харламиди Х.Э.* Перспективы применения магнитных полей для обработки нефтедержающих систем // Материалы IV Международной конференции «Химия нефти и газа». - Томск: СО РАН. - 2000 - Т2. - С.44-46.
7. *Иванов Б.Н., Кравцов Я.И., Демин А.В., Прощекальников Д.В., Харламиди Х.Э.,* Определение изменения энтальпии образования нефтей // Известия Академии Наук, Энергетика, М. 2001 г., №3 с. 120-127.
8. *Иванов Б.Н., Суханов А.П., Минкин В.С.* Ассоциативность модифицированных моторных топлив. // В кн. Материалы V Международной конференции по Химии нефти и газа. – Томск – Изд-во СО РАН. – 2003, с. 476-478.

9. Иванов Б.Н., Садыков А.Р., Суханов А.П., Суханов П.П. Структурополагающие основы ассоциативных процессов нефтепереработки. Сообщения 1, 2 // “Нефтепереработка и нефтехимия”, ЦНИИТЭнефтехим, М., 2004, №6, с. 24 – 27; 2004, №9, с. 17 – 19.
10. Иванов Б.Н. «Филосовский камень» жидкофазных процессов химической технологии. Части I, II // Энергосбережение в Республике Татарстан. – Казань. – 2005. - №21-22, - с. 20-24; 2006-2007, - №23-24. – с. 61-66.
11. Иванов Б.Н. Онтология теоретических основ химической технологии (учебное пособие) / Казань: КГТУ, 2006, -72с.
12. Иванов Б.Н., Минкин В.С., Костромин Р.Н., Билалов М.И. Ассоциативно-волновая природа различных процессов в органических жидкостях, Труды национальной конференции по теплоэнергетике НКТЕ-2006, Казань 5-8.09.2006 г, - Т1. – с. 132-135.
13. Иванов Б.Н., Дацков А.В., Билалов М.И., Костромин Р.Н. К вопросу о характеристиках ассоциативности сложных жидкофазных органических систем и их математическом отображении. Часть 2 / Вестник КТУ, 2007, № 3-4, с. 161-171.
14. Иванов Б.Н., Билалов М.И., Древницкая Е.Л, Минкин В.С. Вещественно-волновая природа нефтяных остатков, шламов и битуминозных песчаников – основа их экологически чистой утилизации // Поволжская регион. молодежная конф. Волновые процессы в средах: сб. докл. Казань-Зеленодольск, 2007. – С. 166-169.
15. Иванов Б.Н. Волновая природа процессов генезиса добычи и подготовки нефти. Части 1-3. // Вестник КТУ. – Казань. – Отечество, - 2008. - №3. - с. 97-115; №4. – с. 100-120; №5. – с. 138-157.
16. Иванов Б.Н., Лебедев Н.А., Древницкая Е.Л. Общий базис процессов и средств стимуляции добычи и подготовки нефти / // Нефтепереработка и нефтехимия. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2008. - №12. - С. 48-52.
17. Иванов, Б.Н. Волновые процессы и технологии добычи и подготовки нефти /Б.Н. Иванов, А.И.Гурьянов, А.М.Гумеров // Казань: АН РТ, «ФЭН», - 2009. - 400 с.
18. Иванов Б.Н., Антипин И.С., Костромин Р.Н. Вещественно-волновая природа материальных систем и их взаимодействий – фундамент нанотехнологий // В Материалах XI международной научно-практической конференции «Нанотехнологии в промышленности» «NANOTECH'2010», Казань 2010.
19. Иванов Б.Н., Мезиков А.К. Четвертая материальная форма проявления закона сохранения // Энергетика Татарстана. – 2016. – №2, - с. 62-67.
20. Иванов Б.Н., Минкин В.С., Николаев К.Г., Желтухин В.С., Шамигуллин Р.Х. Гносеологические корни рациональной методологии получения электретных материалов // Научно-технический вестник Поволжья, Казань, 2017, № 5. - С. 9 – 15.
21. Иванов Б.Н., Желтухин В.С., Гришанова И.А., Николаев К.Г., Минкин В.С., Шамигуллин Р.Х.. Методология рациональных технологий получения электретных материалов // Научно-технический вестник Поволжья, Казань, 2017, № 6. - С. 10 – 17.
22. Николаев К.Г., Иванов Б.Н., Магдеев Э.Р., Шагимуллин Р.Х., Минкин В.С. Химический и физический резонанс в химических процессах и технологиях. Сообщение 1. Особенности и перспективы применения // Научно-технический вестник Поволжья, Казань, 2019, № 1. – с. 8-11.
23. Гумеров Ф.М., Сабирзянов А.Н., Гумерова Г.И. Суб- и сверхкритические флюиды в процессах переработки полимеров. – Казань. – изд-во «ФЭН», – 2007. – 336с.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ (05.13.01)**

05.13.01

И.М. Ажмухамедов д-р техн. наук, Е.В. Мельников

Астраханский государственный университет,
факультет математики и информационных технологий,
кафедра информационной безопасности,
Астрахань, iskandar_agm@mail.ru,
НЧОУ ВО Кубанский институт информзащиты,
кафедра информационной безопасности,
Краснодар, melnikov@magnit.ru

**ОЦЕНКА ХЭМИНГОВОГО РАССТОЯНИЯ СЕГМЕНТНЫХ КОДОВ
МАКСИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ**

В работе впервые на основе известной границы Варшамова-Гильберта получены некоторые аналитические оценки минимального кодового расстояния d_m для сегментов кода максимальной длины, которые позволяют обеспечить весьма малую вероятность необнаруженной ошибки при синхронизации датчиков псевдослучайных последовательностей специальных систем связи.

Ключевые слова: коды максимальной длины, p_0 -сегмент кода максимальной длины, спектр кода, минимальное Хэмингово расстояние, остаточная вероятность, псевдослучайная последовательность.

Известно [1,2,3], что расчет спектра p_0 -сегментов кода максимальной длины является (при $p_0 < 2^n - 1$) необозримой задачей, поэтому приходится ограничиваться лишь оценками спектра N_i , $i=1, \dots, p_0$ и, в частности, такой характеристикой, как минимальное Хэмингово расстояние (d_m). Однако, к настоящему времени, даже по параметру d_m для p_0 -сегментов кодов максимальной длины получены недостаточно полные результаты.

Так в работе [2] были получены эмпирические формулы для расчета длин сегментов последовательностей максимальной длины, которые имеют следующий вид:

$$d_m \geq \alpha \eta - 4, \quad (1)$$

где: α - вес (число ненулевых коэффициентов) полинома $h(x)$,

$$\eta = \frac{k + m}{k},$$

k – степень порождающего полинома $h(x)$,

m – емкость счетчика совпадений, при синхронизации по методу зачетного отрезка (ЗОТ).

В работах [4,5], связанных с синтезом сигналов, обладающих хорошим авто и взаимокорреляционными свойствами, предлагается оценка для боковых пиков функций корреляций из которой непосредственно следует нижняя граница для длин сегмента последовательности максимальной длины:

$$d_m \geq \frac{2n_0^2 - \sqrt{2^k - 1}}{4n_0}.$$

Однако, как отмечают и сами авторы этих работ, данная оценка оказывается хуже тривиальной, если длина сегмента составляет незначительную часть полной длины последовательности равной $2^k - 1$. Имеются также некоторые другие модификации этой оценки, полученные методом моделирования на ЭВМ, которые, однако, не устраняют этого недостатка.

Обычная процедура укорочения циклических кодов, которыми в частности являются последовательности максимальной длины, к сегментным кодам неприменима, так как у последних число комбинаций сохраняется таким же, как и в исходном коде.

Известен также подход с образованием перфорированных кодов, которые образуются из q -ичных последовательностей максимальной длины, путем выбрасывания из порождающей матрицы полного кода некоторых её линейно независимых столбцов. Однако такой метод позволяет укоротить кодовые слова только не менее чем на половину, то есть приводит к кодам с малой скоростью или малой боковой длиной выбросов автокорреляционной функции [2]. И, кроме того, такой подход не приемлем для образования сегментных кодов, ибо последние получаются отбрасыванием подряд правых крайних столбцов порождающей матрицы полного кода.

Расчет спектров сегментов последовательностей максимальной длины и в частном случае их минимального кодового расстояния может быть выполнен путем непосредственного нахождения этих величин на ЭВМ [2]. Результаты таких расчетов, выполненные авторами, для некоторых параметров сегментных кодов при различных образующих полиномах $h(x)$ представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Расчет d_m : сегментов М-последовательностей

К, α , $h(x)$			n	2к	3к	4к
5	3	$1+x^2+x^5$		3	5	8
	5	$1+x^2+x^3+x^4+x^5$		3	5	8
	5	$1+x+x^2+x^4+x^5$		3	5	7
6	3	$1+x+x^6$		3	7	9
	5	$1+x^2+x^3+x^5+x^6$		3	5	8
7	3	$1+x^3+x^7$		3	5	9
	5	$1+x^2+x^5+x^6+x^7$		4	7	9
	7	$1+x+x^2+x^4+x^5+x^6+x^7$		4	6	-
	7	$1+x+x^2+x^3+x^4+x^5+x^7$		3	5	8
8	5	$1+x^2+x^3+x^4+x^8$		4	7	-
	5	$1+x+x^6+x^7+x^8$		4	7	-
	7	$1+x+x^2+x^3+x^4+x^6+x^8$		3	-	-
5	3	$1+x^3+x^{10}$		3	-	-
	5	$1+x^2+x^3+x^8+x^{10}$		5	8	-
	9	$1+x+x^3+x^4+x^5+x^6+x^7+x^8+x^{10}$		5	-	-
	9	$1+x+x^2+x^3+x^4+x^5+x^6+x^9+x^{10}$		4	-	-
	9	$1+x^3+x^4+x^5+x^6+x^7+x^8+x^9+x^{10}$		4	-	-

Ясно, однако, что такой способ пригоден разве лишь при ограниченных величинах показателя степени порождающего полинома “к” в частности при автономном запуске датчиков рекуррентными последовательностями. При использовании же принудительного запуска методом зачетного отрезка (ЗОТ), когда ЛРР на приеме и передаче являются датчиками исходной гаммы, величина “к” оказывается столь большой, что метод непосредственного перебора становится нереализуемым.

Рассмотрим поэтому некоторые аналитические оценки d_m , основанные на известной границе Варшамова-Гильберта [1,2,3]. Согласно этой границе d_m-1 любого систематического кода с проверочной матрицей G , равна рангу этой матрицы. Поэтому если удастся доказать, что ни один набор из d или меньшего числа столбцов матрицы (2) в сумме не образуют нулевой столбец, то такой сегмент М-последовательности будет иметь d_m не менее чем d . Наоборот, если найдется любая комбинация из d столбцов, которые в сумме дают нулевой столбец, то это будет означать, что $d_m \leq d$. Проверочная матрица G вида:

$$G = \begin{vmatrix} h_0 & h_1 & \dots & h_k & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_0 & \dots & h_{k-1} & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & h_0 & \dots & h_{k-1} & h_k \end{vmatrix} \quad (2)$$

определяется, как видно, полиномом $h(x)$, в соответствии с которым реализованы передающий и приёмный ЛПП. Простейшим видом примитивного полинома степени “к”, который имеет минимальный вес 3 является полиномом $h(x)=x^k+x^{k-1}+1$. Легко проверить, что если $m < k$, то $d_m=2$, а если $m \geq k$, то при подстановки коэффициентов этого полинома в матрицу G никакие два столбца этой матрицы в сумме не обращаются в нуль. Поэтому для любых величин “к”, “m” и полиномов данного вида, d_m будет не менее 3-х. С другой стороны при $m=k$, сумма первого и второго и $k-1$ столбцов всегда в сумме дают нуль и, следовательно, для случая $\eta=2$, любых “к” и полинома рассмотренного выше вида $d_m=3$.

Имеется два пути увеличения d_m : один из них при фиксированном η требует увеличения число не нулевых членов полинома $h(x)$; второй состоит в увеличении коэффициента η при фиксированном весе полинома $h(x)$. Ясно, что увеличение величины η при заданном “к” (которое, например, определяется из криптографических соображений) приведет к уменьшению вероятности появления свободного от ошибок зачетного отрезка, то есть участка ПСП из $m+k$ символов, что, в свою очередь, очевидно, приведет к увеличению вероятности не запуска. Поэтому первый способ является более предпочтительным, особенно при больших значениях показателя степени порождающего полинома “к”, как это принято в специальных системах связи.

Ниже в таблице 2 приведены результаты эмпирического расчета величины d_m , выполненных авторами для некоторых сочетаний параметров сегментов и полиномов $h(x)$. В основном эти результаты совпадают с эмпирическими формулами, полученными в работе Махонина [3].

Таблица 2 – Эмпирический расчет величины d_m ,

Параметры сегмента и $h(x)$	$K > 5, \alpha = 3$	
	$\beta = \frac{n-k}{k}$ - нечетно	β - четно
Вид формулы		
Рекуррентный	$d_m(\beta) \geq C_m(\beta - 1) + 4,$ $d_m(\beta = 1) = 3$	$d_m(\beta) \geq d_m(\beta - 1) + 2,$ $d_m(\beta = 1) = 3$
Нерекуррентный	$d_m \geq 6 \left\lfloor \frac{\beta}{2} \right\rfloor + 3 = 3\eta,$ где $\eta = 1 + 2 \left\lfloor \frac{\beta}{2} \right\rfloor$; .. - обозначает целую часть дроби	$d_m \geq 6 \left\lfloor \frac{\beta}{2} \right\rfloor - 1 = 3\eta - 4$

Для того, чтобы получить требуемую величину d_m , воспользуемся оценками вероятности не обнаруженных ошибок, приведенных в работе [5]. Известно: $P_{HO} \leq \frac{2^t}{C_{n+t}^t}$, где

$$t = \left\lceil \frac{d_m - 1}{2} \right\rceil; \quad n = k + m; \quad [\bullet] - \text{означает целую часть дроби.}$$

Результаты расчета для различных значений t и n приведены в таблице 3. Анализ результатов таблицы показывает, что даже при сравнительно малых величинах d_m в двоичном симметричном канале (ДСК) при любой вероятности ошибки P можно обеспечить весьма малую вероятность необнаруженной ошибки при синхронизации псевдослучайных последовательностей (ПСП).

Таблица 3 – Расчет вероятности необнаруженной ошибки при заданном d_m

$t \backslash n$	1	2	3	4	5	6
10	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$6,06 \cdot 10^{-2}$	$2,79 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$7,99 \cdot 10^{-3}$
20	$9,5 \cdot 10^{-2}$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	$4,51 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^{-3}$	$6,02 \cdot 10^{-4}$	$2,77 \cdot 10^{-4}$
40	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$4,63 \cdot 10^{-3}$	$6,48 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$6,83 \cdot 10^{-6}$
60	$3,27 \cdot 10^{-2}$	$2,11 \cdot 10^{-3}$	$2,01 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$3,87 \cdot 10^{-6}$	$7,04 \cdot 10^{-7}$
80	$2,46 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$8,29 \cdot 10^{-6}$	$9,75 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$

Фактически эффективность системы пусковой синхронизации по методу ЗОТ будет оцениваться не вероятностью не обнаруживаемой ошибки, а остаточной вероятностью ошибки, которая определяется как величина, сходящаяся по вероятности отношения числа случаев ложной синхронизации к общему числу случаев срабатывания счетчика “ m ” совпадений.

Остаточная вероятность по определению равна [2,6]:

$$P_{\text{ост}} = \frac{P_{\text{но}}}{P_{\text{но}} + P_{\text{бо}}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{бо}}$ -вероятность без ошибочного ЗОТ.

Предполагая, что в практически важных случаях $P_{\text{бо}} \gg P_{\text{но}}$ получаем приближенную формулу:

$$P_{\text{ост}} \approx \frac{P_{\text{но}}}{P_{\text{бо}}}. \quad (4)$$

Соотношение (4) пригодно для расчета характеристики системы пусковой синхронизации датчика ПСП не только в ДСК, но и в дискретных отображениях каналов с медленными рэлеевскими замираниями [1]. В последнем случае величина $P_{\text{бо}}$ может рассчитана с использованием рекуррентного соотношения [2]:

$$P_{\text{бо}}(n) = \frac{\frac{1}{2^n} + \frac{H^2}{2} \cdot n \cdot P_{\text{бо}}(n-1)}{1 + \frac{H^2}{2} \cdot n}, \quad n > 1 \quad (5)$$

$$P_{\text{бо}}(1) = \frac{H^2 + 1}{H^2 + 2},$$

где H^2 -отношение средней энергии элемента сигнала на выходе непрерывного канала к спектральной плотности аддитивного шума.

Используя данные таблицы 3 и результаты расчета $P_{\text{бо}}$ по рекуррентным формулам (5) получаем, что при выборе длин регистра $k \geq 60$ и длины ЗОТ равной $2k$ и $H^2 \geq 20$ можно получить требуемую величину остаточной вероятности, если d_m сегментов последовательностей максимальной длины оказывается не меньше 7. Результаты моделирования хотя и не позволяют однозначно утверждать, что данное d_m может быть реализовано, однако они явно показывают тенденцию роста d_m при увеличении веса полинома $h(x)$, особенно при больших степенях “ k ”. Поэтому есть основания полагать, что при $k \geq 60$ и весе полинома больше или равно 10-15 требуемая величина d_m будет реализована.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование показало, что при проектировании систем синхронизации ПСП специальных систем связи, по формулам (5) можно обеспечить высокую вероятность синхронизации ПСП на каналах низкого качества, если d_m сегментного кода максимальной длины выбрать не меньше 7. Данное d_m можно реализовать при увеличении веса порождающего полинома $h(x)$ и его степень “к”. Расчеты показали, что требуемое значение минимального кодового расстояния можно обеспечить при $k \geq 60$ и весе полинома больше или равно 10-15.

Список литературы

1. Михайлов Н.Л. Корректирующие коды : Учебное пособие. – Рыбинск, РГАТА, 2010. – 84 с.
2. Коржик В.И., Финк Л.М. Помехоустойчивое кодирование дискретных сообщений в каналах со случайной структурой. \ В.И.Коржик, Л.М.Финк. –М.: Связь, 1975. – 272 с.
3. Махонин В.В. Некоторые свойства рекуррентных последовательностей / В.В.Махонин: Вопросы специальной радиоэлектроники. Сер.ХП, 1965, вып.22
4. Морелос-Сарагоса Р Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение – М: Издательство: Техносфера, 2006. - 320 с
5. Хисамов Ф.Г., Собачкин Д.М. Расчет ложной синхронизации псевдослучайной последовательности по зачетному отрезку в условиях РЭБ / Ф.Г.Хисамов, Д.М.Собачкин // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ – 2016)». Нижний Новгород. Изд. НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2016, С. 118-119

05.13.01

¹С.А. Вологжанина д-р техн. наук, ²А.П. Петкова д-р техн. наук,
¹А.Ф. Иголкин канд. техн. наук, ¹А.А. Перегудов

¹Университет ИТМО,
факультет низкотемпературной техники и энергетики,
Санкт-Петербург, vologjanina@corp.ifmo.ru, mikki435@gmail.com,
²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, apetkova@inbox.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Отдельным этапом при проведении экспериментальных исследований и получении большого объема данных является обработка полученной информации. Использование сравнительного анализа при обработке информации позволило оценить влияние состава материала шва и сварных материалов на химический состав и свойства сварного соединения.

Ключевые слова: обработка информации, оценка механических свойств, альтернативные сварочные материалы.

Наличие в конструкции сварных соединений предъявляет особые требования к свойствам применяемых материалов. Известно, что сварные швы или околошовная зона являются очагами разрушения при эксплуатации оборудования в широком температурном диапазоне. При сварке плавлением чаще всего возможно возникновение трещин, непроваров, пористости, образования шлаковых и оксидных включений, которые оказывают негативное воздействие на работоспособность конструкций, особенно при низких температурах [1-4].

Для изготовления оборудования нефтехимических комплексов в настоящее время используют низколегированные высокопрочные Cr-Mo-V стали [5, 6].

Цель данной работы – провести сравнительную оценку экспериментальных данных для оценки свойств сварных соединений, полученных с использованием различных сварочных материалов при автоматической и ручной дуговой сварке (АДС и РДС). При проведении работ для получения сварных соединений (СС) при АДС использовали сварочные материалы с кодом ВА, а для РДС применяли материалы с кодом ВР.

Последующие испытания механических свойств проводились после проведения послесварочного отпуска с минимальной продолжительностью (PWHT min) $660 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 2,0 - 2,5 час, затем $705^{+5/-10}^\circ\text{C}$, в течение 7,0 – 7,5 час и максимальной продолжительности (PWHT max) при тех же температурах с выдержкой, соответственно в течение 27,0 - 27,5 час и 33,5 – 34,0 час. При этом было необходимо учесть, что механические свойства металла шва в состоянии послесварочного отпуска как минимальной, так и максимальной продолжительности должны соответствовать свойствам основного металла, а значение твердости сварного соединения не должно превышать 248 HV_{10} [7].

Для проведения оценки химического состава металла шва использовали оптический эмиссионный спектрометр «SPECTROLAB»; спектрометр «Axios Advanced»; спектрометр «AAnalyst». Кроме этого, с помощью газового анализатора RH-402 проводили анализ содержания остаточного водорода путем нагрева в потоке инертного газа. Результаты химического анализа металла сварочных материалов, металла шва СС и основного металла представлены на рис. 1. Получение большого массива данных и проведенный анализ позволил установить, что химический состав металла швов, выполненных сварочными материалами для АДС и РДС, соответствует требованиям нормативной документации. Показано, что уровень содержания остаточного водорода в металле шва, выполненном

сварочными материалами для АДС и РДС можно считать приемлемым. Вместе с тем, обнаружено различное количество марганца и кремния в металле шва проб, полученных АДС и РДС, что, вероятно, можно объяснить различным содержанием этих элементов в сварочных материалах.

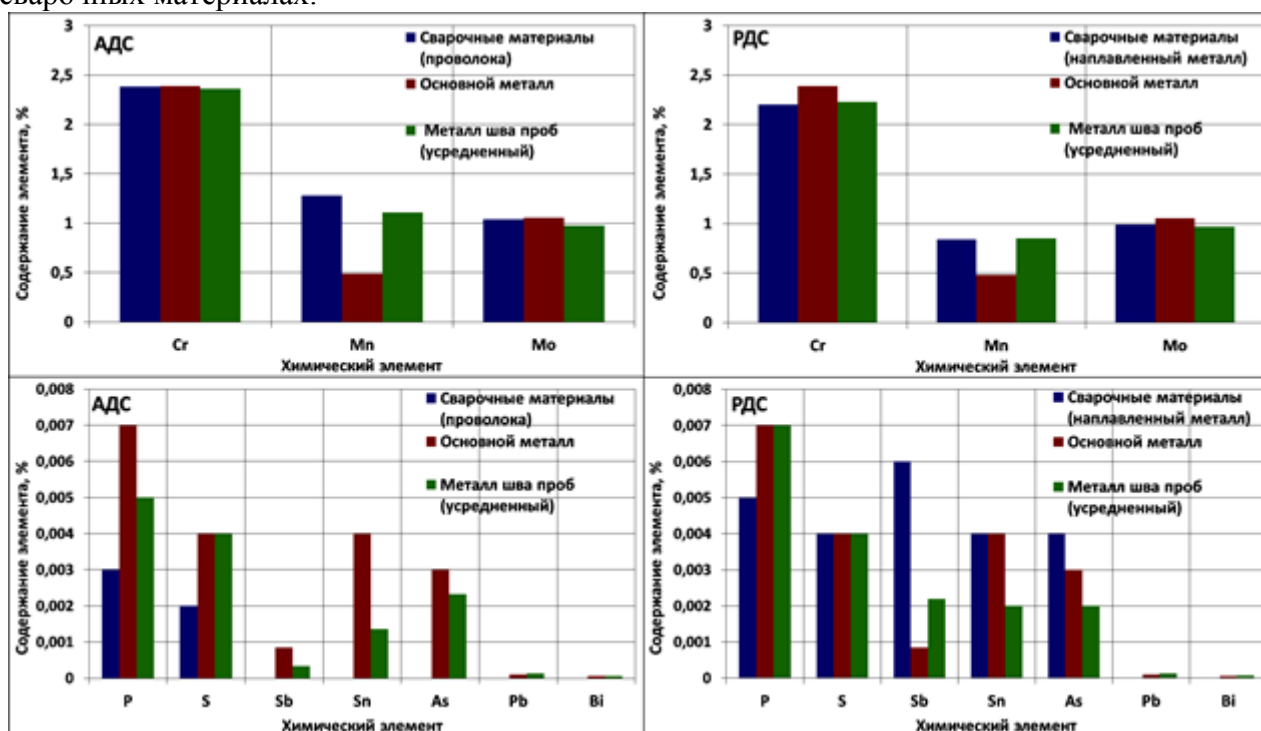


Рис. 1 - Сравнения химического состава сварочных материалов, металла шва и основного металла сварного соединения для АДС и РДС

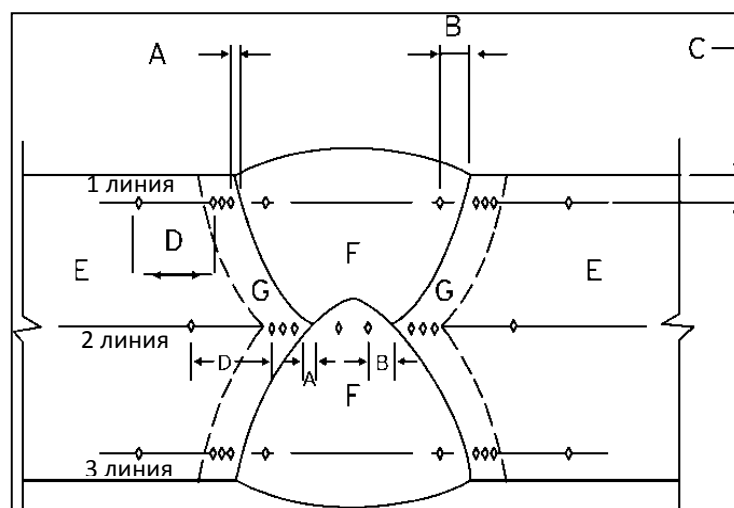
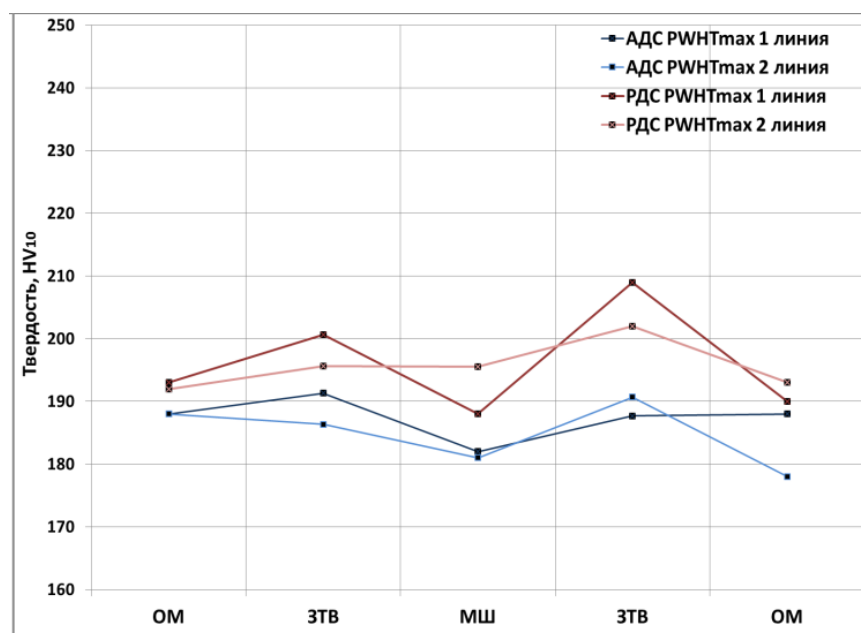
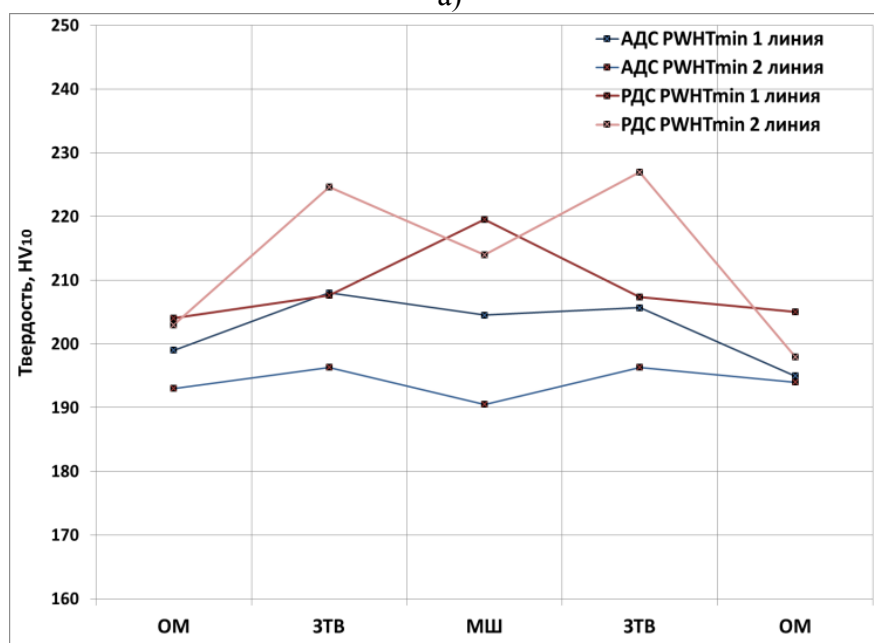


Рис. 2. Схема замера твердости металла шва: А - 0,2 мм; В - 1-3 мм; С - 1-2 мм; D - 3-6 мм; Е - основной металл (ОМ); F - металл шва (МШ); G - зона термического влияния (ЗТВ)



а)



б)

Рис. 3 – Сравнительные данные значений твердостей металла сварных соединений после дополнительного послесварочного отпуска: а) PWHT min; б) PWHT max; ОМ – основной металл; ЗТВ – зона термического влияния, МШ – металл шва

Оценку характеристик прочности проводили в ходе испытаний металла шва на растяжение в соответствии с [8, 9] при температурах 20 °С и 454 °С, имитирующих возможные режимы работы оборудования нефтехимических производств. Значения твердости сварного соединения, определенные в соответствии с [10], в зонах согласно рис. 2, приведены на рис. 3.

Учитывая возможные низкие температуры окружающей среды, оценивали работу удара при испытаниях на ударный изгиб [11, 12] при температурах -18 °С и -30 °С (см. рис. 4).

Сравнительный анализ полученных результатов после испытаний по оценке механических свойств позволил установить следующее.

Для металла шва, полученного способом АДС в состоянии PWHT min уровень работы удара выше требуемого значения 55 Дж в ½ толщине шва как при температуре испытаний минус 18 °С, так и при минус 30 °С. Значение твердости металла шва и в зоне термического

влияния (179÷223) не превышает 248 HV₁₀. В состоянии после PWHT тах значения временного сопротивления ниже требуемых и при комнатной температуре ($R_m = 570$ МПа при требовании 585÷760 МПа), и температуре испытаний 454 °С ($R_m = 460$ МПа при требовании не менее 461 МПа).

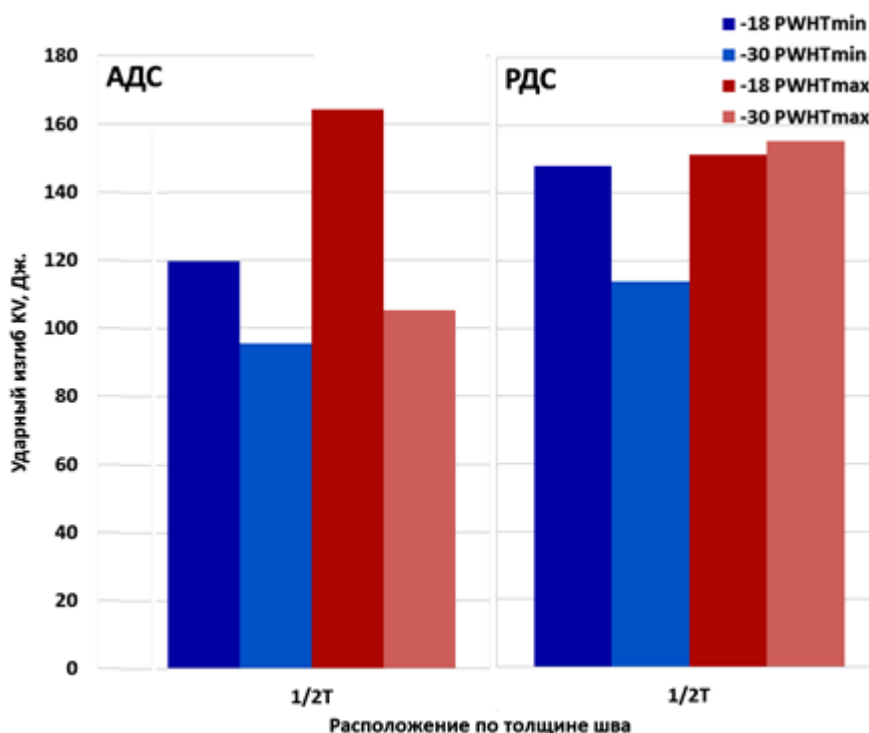


Рис. 4 - Сравнение работы удара KV, Дж металла сварных соединений, полученных методами АДС и РДС

Металл шва повторно выполненной пробы по уровню прочности также не соответствует требованиям ($R_m^{20} = 555$ МПа и $R_m^{454} = 434$ МПа). В то же время величина работы удара и твердости металл шва соответствует требованиям.

Для металла шва, полученного способом РДС, результаты испытаний соответствуют требованиям по всем показателям механических свойств для послесварочного отпуска и минимальной, и максимальной продолжительности.

Выводы:

1. Установлено, что химический состав металла швов, выполненных всеми видами сварочных материалов, соответствует требованиям нормативной документации. Содержание цветных примесей в металле сварного соединения находится в пределах требуемых значений как для АДС, так и РДС. Содержание остаточного водорода в металле шва находится на допустимом уровне. Различие в количестве остаточного водорода может быть связано не только с качеством сварочных материалов, но и с технологическими процессами при сварке.

2. Свойства сварного шва, полученного с помощью аргонодуговой сварки, после проведения послесварочного отпуска максимальной продолжительности не соответствуют требованиям по уровню прочности при всех температурах испытаний. Повторно выполненная проба по уровню прочности также не обеспечила заданных значений. Данное несоответствие прочностных свойств прочности, вероятно, связано с колебанием содержания Mn на границе шов/основной металл.

Список литературы

1. Овчинников В.В. Дефектация сварных швов и контроль качества сварных соединений. - М.: Академия, 2013. — 224 с.
2. Алешин Н.П. и др. Сварка. Резка. Контроль. Том 2 Справочник. - В 2-х томах. - Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. - М.: Машиностроение, 2004. — 480 с.
3. Солнцев Ю.П., Пирайнен В.Ю., Вологжанина С.А. Материаловедение специальных отраслей машиностроения. – СПб.: Химиздат, 2007. – 784 с.
4. Солнцев Ю. П., Титова Т. И. Стали для Севера и Сибири. // СПб.: ХИМИЗДАТ, 2002. – 352.
5. Титова Т.И. и др. Опыт изготовления заготовок из стали 2,25Cr-1,0Mo-0,25V применительно к нефтехимическому оборудованию для глубокой переработки нефти //Тяжелое машиностроение. - 2012, № 7. -С. 30-34.
6. Андреев А.К., Ермаков Б.С. Влияние легирующих элементов на трещиностойкость конструкционных сталей низкотемпературного назначения // Металлы. - 2010. - № 3. - С. 50-55.
7. Титова Т.И., Шульган Н.А., Боровской А.С. Современные требования, предъявляемые к сварочным материалам для сварки нефтехимических сосудов давления, изготавливаемых из стали типа легирования 2,25Cr-1Mo-0,25V. // "Сварочные материалы - 2012": доклады Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции, 16–18 октября 2012 года. СПб.: Изд -во Политехн. ун -та, 2012. -XXX с.
8. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88) Металлы. Методы испытаний на растяжение // <http://docs.cntd.ru/document/1200004888>.
9. ГОСТ 9651-84 (ИСО 783-89) Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах // <http://docs.cntd.ru/document/1200004891>.
10. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу // <http://docs.cntd.ru/document/1200060184>.
11. ГОСТ Р ИСО 9016-2011 Испытания разрушающие сварных швов металлических материалов. Испытание на ударный изгиб. Расположение образца для испытания, ориентация надреза и испытание // <http://docs.cntd.ru/document/1200088811/>.
12. ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах // <http://docs.cntd.ru/document/1200005045>.

05.13.01

¹А.А. Емельянов канд. техн. наук, ²В.В. Малышев д-р техн. наук,
²А.В. Старков канд. техн. наук, ¹Л.А. Гришанцева, ¹К.И. Зубкова, ²Зай Яр Вин

¹Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы»,
Москва, eaa@ntsomz.ru,

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
кафедра «Системный анализ и управление»,
starkov@goldstar.ru

АНАЛИЗ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ЗАДАЧЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЗЗ

Представлены результаты системного анализа функционирования космических систем ДЗЗ в части анализа и формирования показателей эффективности для решения задачи оптимизации распределения потоков целевой. Предлагается осуществить от системных показателей эффективности к интегральным. В качестве интегральных показателей обосновывается выбор времени и стоимости обработки информации.

Ключевые слова: *информационная система, обработка данных, ДЗЗ, эффективность, время, стоимость.*

Введение

При существенном наращивании орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и увеличении пунктов приема и обработки информации (в том числе и мобильных) недостатки в существующих системах обработки будут принимать критический характер [1]. В связи с этим все большую актуальность приобретает задача оптимизации распределения потоков целевой информации внутри системы ДЗЗ, которая, в данном контексте, может рассматриваться как информационная [2,3].

Под эффективным целевым применением информационной системы ДЗЗ понимается использование эксплуатационных возможностей группировки КА системы и наземной инфраструктуры для производства совокупности конечных информационных продуктов, наиболее полно соответствующей совокупности заявок потребителей. С учетом уровня декомпозиции [4] показатели эффективности системы можно разделить на группы:

1) Технические показатели эффективности целевого функционирования: разрешение обработанных снимков; точность плановой привязки обработанных снимков; суммарный объем информации, полученной на наземный комплекс приема, обработки и распространения (НКПОР); суммарная отснятая площадь (производительность системы) и др.

2) Функциональные показатели эффективности системы: вероятности обслуживания заявок в зависимости от приоритета; вероятности отказа в обслуживании заявок в зависимости от приоритета; оперативность исполнения заявок в зависимости от приоритета; глубина обработки отснятых маршрутов в зависимости от приоритета; суммарная относительная площадь, выданная потребителям, в зависимости от приоритета и др.

3) Показатели эффективности системы в целом: суммарное время обслуживания заявок; эффективная производительность системы (суммарная относительная площадь, выданная потребителям); совокупная ценность продуктов обработки отснятых маршрутов; осредненная оперативность исполнения заявок; суммарный объем архивов наземного комплекса приема, обработки и распространения информации (НКПОР) и др.

Все показатели эффективности зависят от баллистической структуры, характеристик целевой аппаратуры и наземного комплекса приема обработки и распределения информации. При этом оптимизация целевых параметров функционирования информационной системы представляет собой два основных блока: оптимизация работы бортовой целевой аппаратуры КА и наземного комплекса.

В некоторых случаях объективно существует возможность перехода от многих показателей к одной или двум-трем целевым функциям (объективное свертывание) [4].

В случае рассматриваемой информационной системы ДЗЗ, в состав которой входят компоненты космического и наземного сегмента объективное свертывание позволяет перейти к частным показателями, характеризующими эффективность целевого функционирования, которыми являются оперативность (время) выполнения заявок на получение готового тематического продукта и стоимость готового тематического продукта.

Оперативность выполнения заявок зависит от оперативности приема-передачи информации с борта КА на пункт приема информации (ППИ) и времени, необходимого для проведения съемки. Данный показатель напрямую зависит от параметров заявки потребителя (географического положения, наблюдаемой площади, спектральных диапазонов, требований к тематическому продукту), географического расположения ППИ, их возможностей по получению готового тематического продукта, баллистического построения орбитальной группировки КА ДЗЗ и поэтому может использоваться как комплексный (интегральный) показатель эффективности информационной системы ДЗЗ.

Стоимость готового тематического продукта также характеризует эффективность целевого функционирования информационной системы ДЗЗ. Для минимизации значения этого показателя необходимо решить оптимизационную задачу оперативного планирования обработки заявки потребителя, т.е. сформировать план (маршрут) обработки информации. Этот показатель рассчитывается на основе моделирования процесса обработки информации с момента подачи заявки до момента передачи требуемого тематического продукта потребителю и, таким образом, характеризует эффективность целевого функционирования информационной системы ДЗЗ с учетом параметров бортовой целевой аппаратуры КА, баллистического построения орбитальной группировки, факторов внешней среды, режимов съемки и передачи информации. Этот показатель также является комплексным (интегральным).

Как видно из характеристик упомянутых выше показателей, каждый из них зависит от орбитального построения КСН и параметров бортовой целевой аппаратуры КА, характеристик НКПОР и в целом характеризует степень достижения целей информационной системы – получение потребителем информации с заданными требованиями по спектральному разрешению, периодичности наблюдений и оперативности передачи информации. Перейдем к формализации описанных выше показателей эффективности целевого функционирования КСН.

Оперативность (время) выполнения единичной заявки

Оперативность (время) выполнения единичной j_q -й заявки на получение готового тематического продукта естественно оценивать временем обслуживания $T_{\text{обсл } q}$, которое определяется формулой:

$$T_{\text{обсл } q} = t_{\text{дос2}} - t_0, \quad (1)$$

где t_0 – момент поступления заявки в систему; $t_{\text{дос2}}$ – момент окончания доставки конечного продукта от ППИ, определенного циклограммой, до потребителя. Среднее время $\bar{T}_{\text{обсл } q}$ исполнения заявок потребителей из множества Ω_q рассчитывается по соотношению:

$$\bar{T}_{\text{обсл } q} = \frac{1}{j_q^*} \sum_{j_q=1}^{j_q^*} T_{\text{обсл } q} \quad (2)$$

Показатель (2) количественно оценивает оперативность исполнения заявок из q -го входящего потока. Использование этой формулы для разных q ($q = 1, 2, \dots, q^*$) позволяет найти вектор

$$\bar{T}_{\text{обсл}} = (\bar{T}_{\text{обсл } 1}, \bar{T}_{\text{обсл } 2}, \dots, \bar{T}_{\text{обсл } q^*})^T, \quad (3)$$

отражающий распределение среднего времени обслуживания заявок в зависимости от приоритета. Осреднение величины $T_{\text{обсл } q}$ по всему множеству заявок дает оценку математического ожидания времени исполнения (обслуживания) заявок $M_{t_{\text{обсл}}}$:

$$M_{t_{\text{обсл}}} = \frac{1}{q^*} \sum_{q=1}^{q^*} \bar{T}_{\text{обсл } q}, \quad (4)$$

и среднеквадратического отклонения времени исполнения (обслуживания) заявок:

$$\sigma_{t \text{ обл}} = \sqrt{\frac{1}{j^*} \sum_{j=1}^{j^*} t_{\text{обсл } j}^2 - M_{t \text{ обл}}^2}, \quad (5)$$

Тип закона распределения времени обслуживания заявок системой в целом, строго говоря, не известен. Однако, оценки главных его параметров: математического ожидания и среднеквадратического отклонения можно получить обработкой результатов статистического моделирования. Считается, что в первом приближении величину гарантированного времени обслуживания заявки $T_{\text{гар}}$ можно оценить по соотношению

$$T_{\text{гар}} = M_{t \text{ обл}} + 3\sigma_{t \text{ обл}}, \quad (6)$$

в котором слагаемые правой части вычисляются с использованием формул (4) и (5). Показатель (1) можно рассматривать как один из критериев предпочтения при выборе оптимального маршрута обработки информации, а показатели (4) и (5) – как качественные параметры для оценки распределения времени обслуживания заявок системой в целом.

Стоимость обслуживания единичной заявки

Стоимость обслуживания единичной заявки C_{jq} складывается из составляющих, соответствующих основным процессам, рассмотренным в п. 3.9. По мере выполнения стадий технологического процесса обслуживания j_q -й заявки величина C_{jq} растет. Укрупненно ее можно представить в виде суммы условной стоимости $C_{jq\text{КА}}$ снимка маршрута, размещенного в виде файла в БЗУ s -го КА и стоимости $C_{jq\text{НКИ}}$ его наземной маршрутизации и обработки:

$$C_{jq} = C_{jq\text{КА}} + C_{jq\text{НКИ}}, \quad (7)$$

Составляющая $C_{jq\text{КА}}$ обусловлена, в основном, удельными трудозатратами на планирование и расходованием ресурса s -го КА орбитальной группировки. Составляющая $C_{jq\text{НКИ}}$ зависит от заданного в заявке уровня обработки и задействованных в передаче и обработке ППИ, т.е. от искомого маршрута обработки и передачи обрабатываемого снимка между ППИ. Совокупная стоимость обслуживания всех заявок от потребителей из множества Ω определяется равенством:

$$C_{\Sigma} = \delta_{jq} \sum_{q=1}^{q^*} \sum_{j_q=1}^{j_q^*} C_{jq}, \quad (8)$$

где $\delta_{jq}(K) = 0$ или 1 – индикатор качества продукта, зависящий от оценки, характеризующей соответствие его качества требованиям, заданным в j_q -й заявке. Требования к продукту, содержащиеся в заявке, можно разделить на две группы: 1) безусловные и 2) условные. К первой группе относятся требования, подлежащие обязательному выполнению, т.е. невыполнение любого из требований первой группы автоматически означает невыполнение заявки в целом. Эти требования формулируются в виде равенств. Ко второй группе относятся требования «диапазонного» типа, формулируемые в виде неравенств. Пример разделения заявочных требований на группы представлено в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Требования, подлежащие обязательному исполнению

№ п/п	Атрибут заявки	Тип исполнения
1	Тип платформы-носителя целевой аппаратуры	Да/нет
2	Состав аппаратуры, спектральные диапазоны	Да/нет
3	Приоритет районов (если их несколько)	Да/нет
4	Радиометрическое разрешение	Да/нет
5	Код уровня обработки	Да/нет
6	Система координат выходного изображения	Да/нет
7	Максимальный размер обработанного файла	Да/нет
8	Формат записи	Да/нет
9	Способ передачи конечного продукта	Да/нет

Таблица 2 – Требования «диапазонного» типа

№ п/п	Атрибут заявки	Минимальное значение	Максимальное значение
10	Интервал дат съемки	$t_{\text{смк } 1}^{\min}$	$t_{\text{смк } 1}^{\max}$
11	Периодичность съемки	$\Delta t_{\text{смк } 1}^{\min}$	$\Delta t_{\text{смк } 1}^{\max}$
12	Диапазон допустимых углов Солнца	$\gamma_{\text{sun}}^{\min}$	$\gamma_{\text{sun}}^{\max}$
13	Угол визирования	0	$\gamma_{jq}^{\max}$
14	Максимальная допустимая доля района, закрытая облачностью	0	$\Delta S_{jq}^{\max}$

В рассмотренном примере показатель качества продукта K определяется равенством

$$K = \sum_{l=1}^{14} k_l, \quad (9)$$

Индикатор δ_{jq} качества продукта, изготовленного по j -й заявке, определяется по формуле

$$\delta_{jq}(K) = \begin{cases} 1, & 9 < K \leq 14 \\ 0, & K \leq 9 \end{cases} \quad (10)$$

Показатель (7) можно рассматривать как один из критериев предпочтения при выборе оптимального маршрута обработки информации, а показатель (8) – как качественный параметр для оценки совокупной стоимости обслуживания заявок системой в целом.

Выбор независимых переменных

Решение задачи оптимизации показателей эффективности всегда требует наличие вектора независимых переменных. Независимая переменная должна быть относительно самостоятельным фактором, который оказывает свойственное именно ему воздействие на систему. Для нашей информационной системы в качестве таких независимых переменных предлагается использовать: **системное время** и **объем** (или условный объем, или трафик) перемещаемой в системе информации. Действительно, зная время и объем информации можно прямо или косвенно рассчитать как время, так и стоимость необходимые для обработки информации.

Заключение

Таким образом, для оптимизации задачи распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем ДЗЗ предлагается использовать два интегральных показателя: время и стоимость обработки заявки потребителя. Для качественной оценки функционирования системы предлагается использовать математическое и среднеквадратическое отклонение времени исполнения (обслуживания) и совокупную стоимость обслуженных заявок потребителей. Преимуществом предложенного подхода является: уменьшение размерности вектора показателей эффективности до двух, что позволит использовать эффективные методы многокритериальной оптимизации; аддитивность показателей эффективности, что существенно упрощает математическое описание и расчет их составных частей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № 9.7505.2017/БЧ)

Список литературы

1. Тюлин А.Е., Селин В.А., Емельянов А.А. Актуализация приоритетов развития отечественной отрасли дистанционного зондирования Земли из космоса // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. Сборник. - М.: МАИ, 2018. с.17-18
2. Емельянов А.А., Малышев В.В., Нгуен Виет Хоай Нам, Старков А.В. Математическая модель функционирования наземного сегмента обработки данных ДЗЗ в части распределения процессов обработки // Научно-технический вестник Поволжья №2 2018 с.74-79
3. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ, 2017, №96, http://mai.ru/upload/iblock/8cc/Emelyanov_Malyshev_Smolyaninov_Starkov_rus.pdf
4. Лебедев А.А., Нестеренко О.П. Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.

05.13.01

¹А.А. Емельянов канд. техн. наук, ²В.В. Малышев д-р техн. наук,
²А.В. Старков канд. техн. наук, ¹Л.А. Гришанцева, ¹К.И. Зубкова, ²Зай Яр Вин

¹Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы»,
 Москва, eaa@ntsomz.ru,

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
 кафедра «Системный анализ и управление»,
 starkov@goldstar.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЗЗ

Представлены основные результаты экспериментальной отработки решения задачи оптимизации распределения потоков целевой в информационном сегменте системы ДЗЗ. Описаны основные компоненты программно-моделирующего комплекса для формализация процессов обработки и передачи данных, а также организации моделирования. Проведена демонстрация результатов его работы в условиях, приближенных к реальным.

Ключевые слова: программно-моделирующий комплекс, время, стоимость, экспериментальная обработка данных, ДЗЗ, космический и наземный сегмент.

Введение

Информационная система ДЗЗ предназначена для обработки заявок потребителей на тематические продукты, производимые по информации дистанционного зондирования, получаемой с помощью аппаратуры наблюдения космических аппаратов (КА) существующей и перспективной орбитальной группировки. Она включает пункты приема, обработки и распространения (НКПОР) информации, имеющих разнообразное аппаратно-программное обеспечение.

Важную роль в моделировании процесса функционирования играет модель распределения заявки по составным частям сегмента обработки данных ДЗЗ, так как результаты именно ее применения, в конечном итоге, используются для решения задачи оптимизации пути прохождения заявок по пунктам обработки до потребителя. При этом, упорядоченное множество вариантов выполнения заявки образуют направленный граф (см. рисунок 1) [3,4].

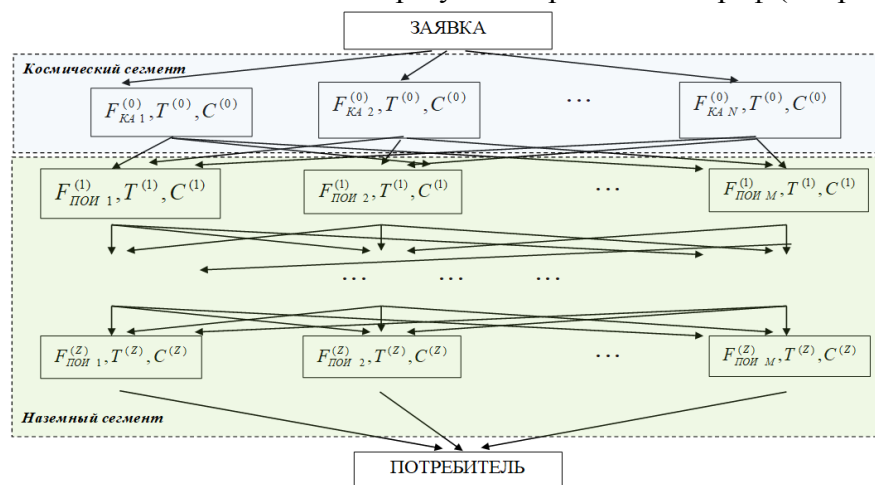


Рис. 1– Модель распределения заявки

На вершине графа мы имеем заявку потребителя. Далее расположен космический сегмент, который в рамках представленной модели является генератором информации в системе (трафика). Условный объем информации (трафик) принят нами в качестве одной из

независимых переменных, на основе которых производятся определение изменения трафика при выполнении процесса, а также вычисляются временной и стоимостной показатели. Второй независимый параметр – системное время служит для формирования ограничения по объему и количеству одновременно выполняемых процессов при обслуживании нескольких заявок.

На уровнях вертикали графа располагаются процессы обработки распределенные по элементам инфраструктуры (по горизонтали). Вывести узел графа из процесса обработки можно путем формирования в нем штрафов по времени обработки T и условной стоимости C .

На последнем уровне находится потребитель. Для каждой заявки он единственный и все процессы обработки в конечном итоге сходятся к нему. Прохождение трафика заявки по графу позволяет вычислить показатели эффективности маршрута: время

$$T_{\Sigma} = T_{KA} + \sum_{P=0}^Z \{T^P + T_{LC}^P\}, \quad T_{LC}^P = \frac{V_{BX}^P}{V^P} \text{ и условная стоимость } C_{\Sigma} = C_{KA} + \sum_{P=0}^Z \{C^P + C_{LC}^P\}, \quad C_{LC}^P -$$

стоимость передачи информации.

При поступлении j -й необходимо рассчитать «окна возможностей» каждого этапа обработки информации с учетом ранее полученных $k=1...j-1$ заявок и зарезервировать одно из них для съемки района по j -й заявки (рисунок .2) с учетом минимизации представленных выше показателей эффективности.

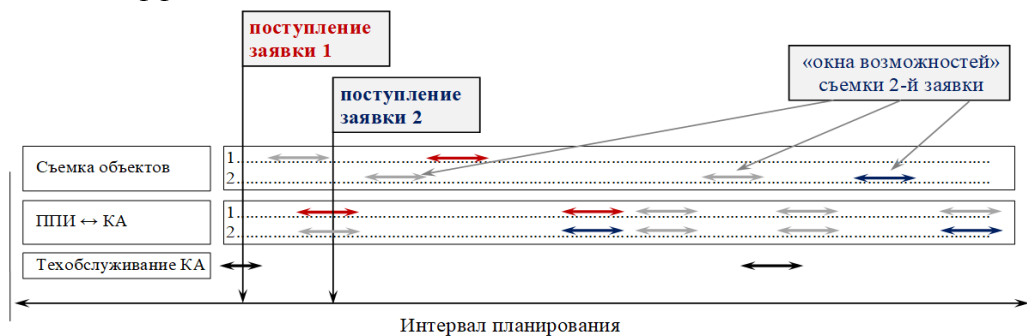


Рис. 2– Последовательность обработки заявок по мере их поступления

Как следует из постановки, задача оптимального распределения целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям информационной системы ДЗЗ является многокритериальной. При малом количестве узлов и заявок пользователей задача оптимального распределения может быть решена методом перебора. В противном случае возможно применение одного из следующих методов: метод линейной свертки критериев; метод Парето и его модификации; метод последовательных уступок и ограничений; методы случайной оптимизации.

Программно-моделирующий комплекс

Сложность процессов, происходящих при обработке данных ДЗЗ, приводит к тому, что их исследование на основе аналитических моделей для широкого диапазона исходных данных возможно лишь при введении допущений, снижающих адекватность получаемых результатов. Одним из способов, позволяющих оценить качество заложенных алгоритмов оптимизации и информационного обмена, а также получить ряд частных статистических данных, необходимых для разработки адекватных аналитических моделей, является использование математического моделирования на базе предлагаемого авторами специализированного программно-моделирующего комплекса (ПМК). Основными назначением ПМК является: формализация процессов обработки и передачи данных; организация выполнения и взаимодействия процессов, их взаимодействия с программным обеспечением информационно-вычислительной системы в модельном и в реальном времени; управление процессом решения задачи, как в диалоговом, так и в пакетном режиме работы с использованием сценариев обработки; оперативное отображение результатов в графическом и табличном виде; регистрация и обработка результатов.

ПМК предназначен для формализация процессов обработки и передачи данных, а также организации моделирования выполнения и взаимодействия процессов при распределении целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям информационной системы ДЗЗ как отдельно, так и в составе моделирующего стенда.

ПМК обеспечивает возможность выполнения перечисленных следующих функций: редактирования входных данных; проведения расчетов по распределению целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям информационной системы ДЗЗ; просмотра выходных данных сохранения результатов в буфер обмена и файлы. ПМК состоит из модулей, позволяющих реализовать следующую последовательность действий при моделировании:

- 1) Формирование исходных данных наземного и космического сегментов;
- 2) Формирование исходных данных для расчета функций генерации трафика и производительности наземных пунктов приема и обработки информации (ППИ);
- 3) Формирование исходных данных для расчета производительности линий связи между узлами инфраструктуры;
- 4) Формирование исходных данных по заявке потребителя;
- 5) Решение задачи распределения целевой информации по составным частям информационной системы ДЗЗ.

Проведение экспериментальной отработки

Для определения возможностей ПМК авторами была проведена экспериментальная отработка математической модели функционирования информационной системы ДЗЗ. В качестве исходных данных были использованы действующий состав и характеристики российской орбитальной группировки и наземных пунктов.

Для определения характеристик сценариев обработки были рассчитаны коэффициенты стоимости обработки информации ДЗЗ на каждом узле информационной системы. В качестве основных узлов выбраны самые модернизированные на сегодняшний день узлы.

Простейший сценарий работы с информацией был разделен на несколько последовательных процессов вне зависимости от КА:

- а) прием информации происходит практически в автоматическом режиме для каждого ППИ, но, тем не менее, на случай внештатных ситуаций необходимо присутствие оператора для принятия быстрых решений;
- б) первичная обработка, где информация проходит оценку на предмет сбоев и потерь;
- в) каталогизация, которая заключается в географической привязке маршрута, отрисовке облачности и записи в архив;
- г) стандартная обработка.

Для определения стоимости использовались следующие параметры: стоимость 1 часа работы оператора в каждом узле; количество людей в смене и режим работы; стоимость приема и др. На их основе сформированы модели: стоимости приема, стоимости архивации и каталогизации, стоимости стандартной обработки и передачи информации.

В качестве решения принималось решение из множества Парето [4], которое максимально приближено к началу координат. Пример такого решения представлен на рисунке 3.

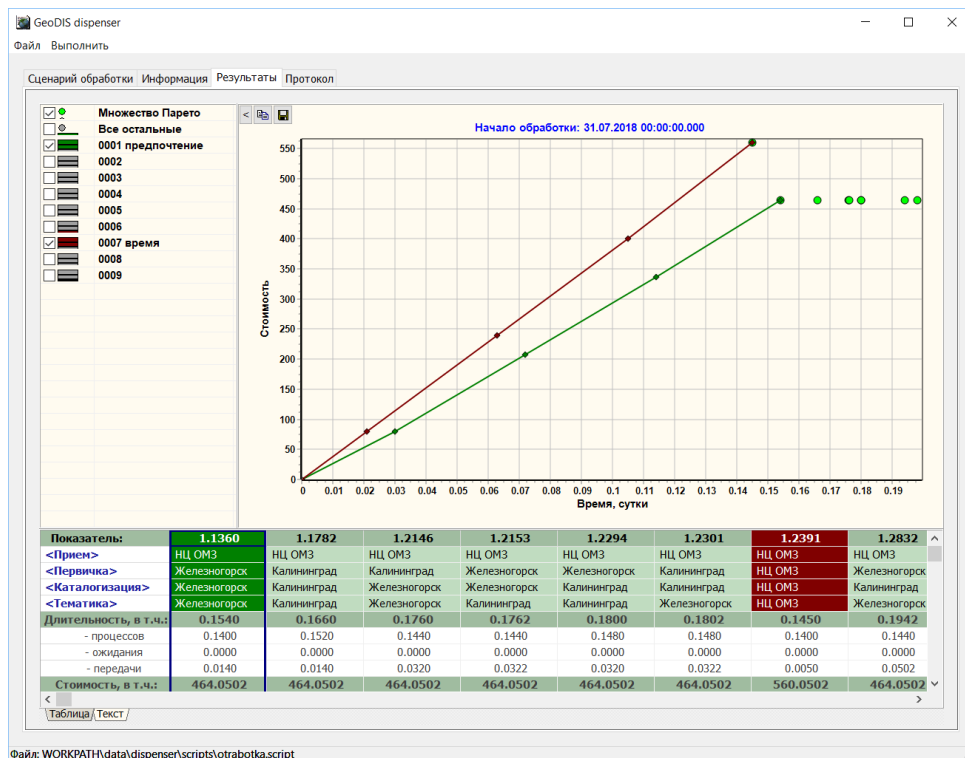


Рис. 3– Пример определения предпочтительной последовательности обработки информации по Парето

Моделирование потока приходящих однотипных заявок также показало корректность принятых моделей и алгоритмов. Например, результат моделирования подтвердил существующую практику обработки основной части информации в НЦ ОМЗ, в то время как дугой узел «страхует» его в моменты сильной загрузки (рисунок 4).

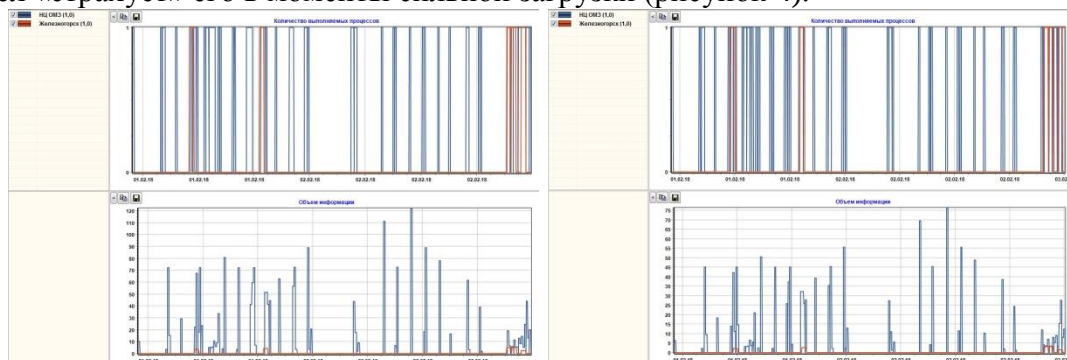


Рис. 4– Первичная обработка и каталогизация при обработке потока заявок

Заключение

В данной статье представлены основные результаты отработки математических моделей, необходимых для решения задачи оптимизации распределения целевой информации КА по составным частям космической и наземной инфраструктуры при обработке космической информации. К основным моделям для отработки использовались: модель заявки потребителя; модель спутниковой группировки; модель аппаратуры наблюдения; модель наземных пунктов приёма и передачи космической информации.

Математическая модель и методики распределения целевой информации с разнотипных российских КА ДЗЗ по составным частям информационной системы ДЗЗ прошла экспериментальную отработку в условиях, приближенных к реальным с ожидаемым результатом. Программное обеспечение, реализующее разработанную математическую модель, обеспечивает широкие возможности по настройке моделируемой системы, как по составу, так и по характеристикам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № 9.7505.2017/БЧ)

Список литературы

1. Тюлин А.Е., Селин В.А., Емельянов А.А. Актуализация приоритетов развития отечественной отрасли дистанционного зондирования Земли из космоса // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. Сборник. - М.: МАИ, 2018. с.17-18
2. Емельянов А.А., Малышев В.В., Нгуен Виет Хоай Нам, Старков А.В. Математическая модель функционирования наземного сегмента обработки данных ДЗЗ в части распределения процессов обработки // Научно-технический вестник Поволжья №2 2018 с.74-79
3. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ, 2017, №96, http://mai.ru/upload/iblock/8cc/Emelyanov_Malyshev_Smolyaninov_Starkov_rus.pdf
4. Малышев В.В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления // Изд. МАИ-ПРИНТ – Москва 2010.

05.13.01

С.И. Лаптев, С.Н. Антропов, А.П. Буйносов д-р техн. наук

Уральский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург, serj2212@mail.ru, se-antr@mail.ru, byinosov@mail.ru

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ТЕЛЕЖКИ ГАЗОТУРБОВОЗА КАК СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМОЙ СИСТЕМЫ

В статье приводятся основные принципы теоретического расчета прочности тележки экипажной части современного газотурбовоза. Тележка железнодорожного подвижного состава рассматривается как статически определимая система.

Ключевые слова: *железнодорожный транспорт, газотурбовоз, тележка, система, статика, пределенность, прочность, расчет.*

Рама тележки газотурбовоза (ГТ) представляет собой сложную пространственную систему, которая в зависимости от режима работы ГТ нагружена сочетанием самых разнообразных сил. Расчет напряженности в сечениях отдельных элементов представляет сложную задачу, ибо рама тележки ГТ как пространственная ферма представляет собой статически неопределимую систему [1].

В приближенных расчетах раму тележки ГТ можно рассматривать как статически определимую систему, которая состоит из отдельных балок, имеющих между собой шарнирные связи. При этом рассчитываются только боковины как наиболее нагруженные элементы рамы. Рекомендуется совместить обе боковины рамы 1 и 2 (рис. 1) тележки ГТ в одну вертикальную плоскость. На рис. 2 приведена расчетная схема для трехосной тележки ГТ.

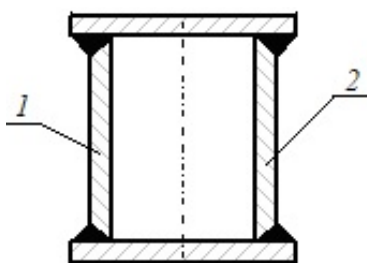


Рис. 1. Сечения продольных балок сварной рамы тележки ГТ

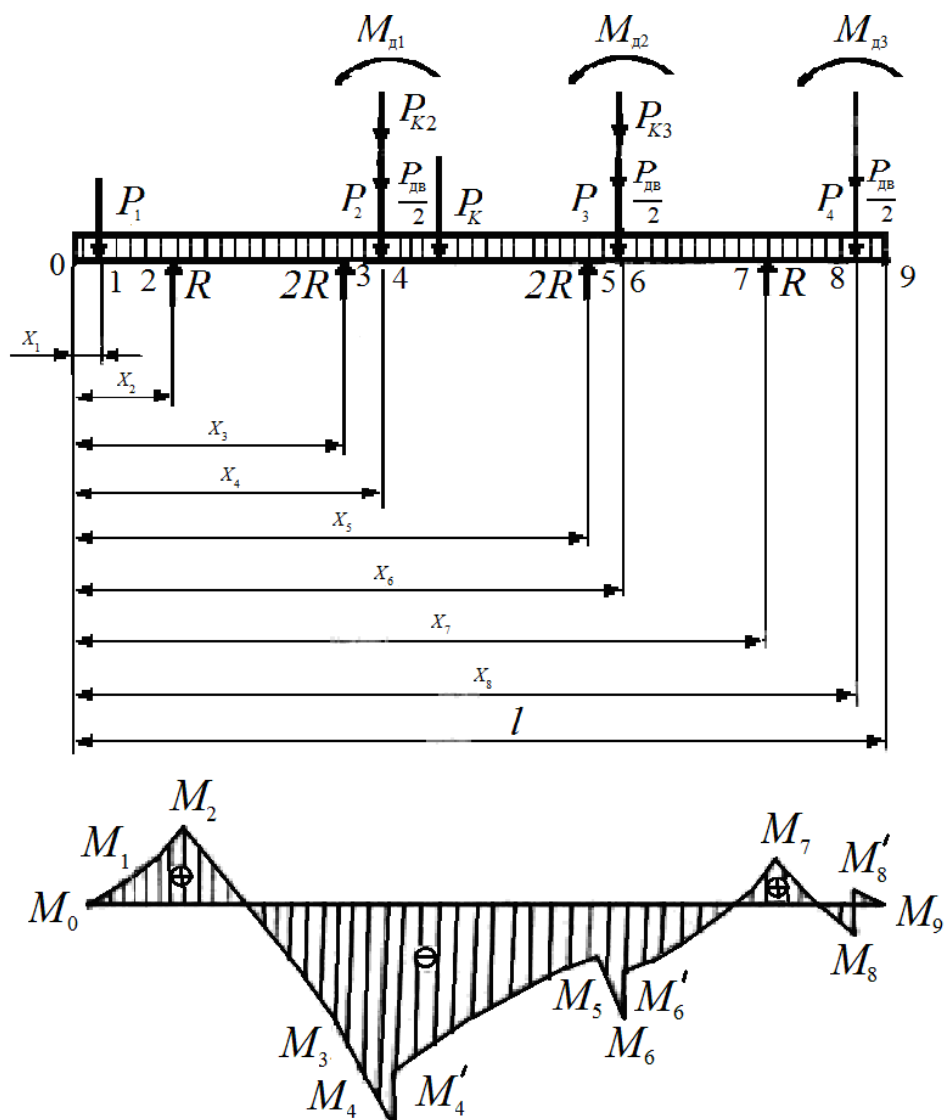


Рис. 2. Расчетная схема для трехосной тележки ГТ

Изгибающие моменты в сечениях 0, 1, 2, ... и 9 боковины имеют следующие значения [2]:

$$M_0 = 0, \quad (1)$$

$$M_1 = \frac{q \cdot X_1^2}{2}, \quad (2)$$

$$M_2 = \frac{q \cdot X_2^2}{2} + P_1 \cdot (X_2 - X_1), \quad (3)$$

$$M_3 = \frac{q \cdot X_3^2}{2} + P_1 \cdot (X_3 - X_1) - R \cdot (X_3 - X_2), \quad (4)$$

$$M_4 = \frac{q \cdot X_4^2}{2} + P_1 \cdot (X_4 - X_1) - R \cdot (X_4 - X_2) - 2 \cdot R \cdot (X_4 - X_3), \quad (5)$$

$$M'_4 = M_4 + M_{Д1}, \quad (6)$$

$$M_5 = \frac{q \cdot X_5^2}{2} + P_1 \cdot (X_5 - X_1) - R \cdot (X_5 - X_2) - 2 \cdot R \cdot (X_5 - X_3) + \\ + \left(P_2 + P_{K2} + \frac{P_{ДВ}}{2} \right) \cdot (X_5 - X_4) + M_{Д1}, \quad (7)$$

$$M_6 = \frac{q \cdot X_6^2}{2} + P_1 \cdot (X_6 - X_1) - R \cdot (X_6 - X_2) - 2 \cdot R \cdot (X_6 - X_3) - 2 \cdot R \cdot (X_6 - X_5) + \left(P_2 + P_{K2} + \frac{P_{дв}}{2} \right) \cdot (X_6 - X_4) + M_{д1}, \quad (8)$$

$$M'_6 = M_6 + M_{д2}, \quad (9)$$

$$M_7 = \frac{q \cdot X_7^2}{2} + P_1 \cdot (X_7 - X_1) - R \cdot (X_7 - X_2) - 2 \cdot R \cdot (X_7 - X_3) - 2 \cdot R \cdot (X_7 - X_5) + \left(P_2 + P_{K2} + \frac{P_{дв}}{2} \right) \cdot (X_7 - X_4) + M_{д1} + \left(P_3 + P_{K3} + \frac{P_{дв}}{2} \right) \cdot (X_7 - X_6) + M_{д2}, \quad (10)$$

$$M_8 = \frac{q \cdot X_8^2}{2} + P_1 \cdot (X_8 - X_1) - R \cdot (X_8 - X_2) - 2 \cdot R \cdot (X_8 - X_3) - 2 \cdot R \cdot (X_8 - X_5) + \left(P_2 + P_{K2} + \frac{P_{дв}}{2} \right) \cdot (X_8 - X_4) + M_{д1} + \left(P_3 + P_{K3} + \frac{P_{дв}}{2} \right) \cdot (X_8 - X_6) + M_{д2} - R \cdot (X_8 - X_7), \quad (11)$$

$$M'_8 = M_8 + M_{д3}. \quad (12)$$

Изгибающий момент в последнем (девятом) сечении должен быть равен нулю, если вычисления сделаны правильно и условия равновесия рамы тележки ГТ не нарушены [3]. В противном случае необходимо найти ошибку и исправить расчеты.

Зная изгибающие моменты в расчетных сечениях боковины рамы, находят напряжения в них:

$$\sigma = \frac{M}{2 \cdot W_y} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_T}{n}. \quad (13)$$

Здесь $2 \cdot W_y$ – момент сопротивления изгибу двух совмещенных боковин.

Далее найденные напряжения сравнивают с допустимыми, которые принимаются в соответствии с коэффициентом запаса прочности и выбранной марки стали [4].

Так же необходимо определить напряжения в раме тележки от вертикальной статической нагрузки $\sigma_{ст}$, затем дополнительные напряжения при следовании ГТ с наибольшей силой тяги в криволинейном участке пути и в режиме торможения $\sigma_{тк}$ для каждого из рассматриваемых сечений.

Для рамы тележки ГТ характерен ассиметричный цикл нагружения при среднем напряжением σ_m и амплитудой переменного напряжения σ_a . Расчетное напряжение ($\sigma_{ст} + \sigma_{тк}$) принимается равным среднему напряжению цикла. Амплитуда цикла переменного динамического напряжения определяется как произведение [5]:

$$\sigma_a = K_d \cdot \sigma_{ст}, \quad (14)$$

где K_d – коэффициент динамики, зависящий от качества рессорного подвешивания ГТ, величины предварительного напряжения детали и величины ударов за счет неровностей пути и бандажей колесных пар.

Следует отметить, что коэффициент динамики при определении прочности детали отличается от коэффициента вертикальной динамики, используемого для определения дополнительной нагрузки на раму ГТ при колебании наддресорного строения. Каждой детали свойственна собственная частота колебания тем большая, чем выше жесткость самой детали. Эти колебания, складываясь с колебаниями подрессоренной части ГТ, определяют коэффициент динамики при расчете детали на усталостную прочность.

Чтобы определить предел усталости рассчитываемой детали надо учитывать влияние факторов, создающих концентрацию напряжения в расчетном сечении, значительное различие в размерах детали и испытанного образца, неоднородность материала детали, различие в состоянии поверхности детали и образца, внутренние остаточные напряжения и т. д. Все эти факторы снижают предел усталости детали и оцениваются коэффициентом.

Коэффициент запаса прочности по нормальным напряжениям для расчетного сечения определяется по формуле [6]:

$$n = \left\{ \frac{\sigma_{-1}}{(K_{\sigma})_d} + \sigma_m \left[1 - \frac{\Psi_{\sigma}}{(K_{\sigma})_d} \right] \right\} \frac{1}{\sigma_m + \sigma_a}, \quad (15)$$

$$\Psi_{\sigma} = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}, \quad (16)$$

где σ_{-1} – предел усталости для полированного образца, изготовленного из того же материала, что и деталь при знакопеременном цикле нагружения; Ψ_{σ} – коэффициент чувствительности металла к асимметрии цикла; σ_0 – предел выносливости при пульсирующем напряжении; $(K_{\sigma})_d$ – коэффициент снижения прочности; K_{σ} – коэффициент, оценивающий снижение предела усталости за счет концентрации напряжений, неоднородности металла шва и неблагоприятных остаточных напряжений, появившихся после сварки. Для обработанных двусторонних швов $K_{\sigma} = 1,25-1,9$.

Коэффициент запаса прочности n принимается относительно предела текучести σ_T (13) выбранной стали (для сталей марки 55С2 и 60С2 $\sigma_T = 28$ кГс/мм²) и может быть рекомендован в следующих пределах для расчета:

- рамы на вертикальную статическую нагрузку, $n = 2,0-2,5$;
- прочности рамы тележки ГТ на усилия, возникающие при выкатке колесных пар, $n = 1,2-1,5$;
- на удар в автосцепку, $n = 1,0-1,2$.

После остывания в шве и околошовной зоне возникают напряжения растяжения. Складываясь с напряжениями растяжения от нагрузки, они снижают прочность. Уменьшение этих напряжений может быть достигнуто механической обработкой шва. Наибольший эффект дает наклеп шва пневматическим молотком с бойком закругленным радиусом 3–5 мм. Хороший эффект можно получить также дробеструйным наклепом. Наклеп повышает предел усталости поперечных швов на 60 %, продольных – на 26 %.

Определение деформации и напряжения этим методом возможно после того, как установлены все сечения рамы и разработана предварительно конструкция рамы. Этот метод позволяет уточнить результаты упрощенных расчетов. В упрощенном расчете, так же как и в уточненном расчете методом сил, не учитывается концентрация напряжений в переходных сечениях и остаточные напряжения.

Список литературы

1. Лаптев С.И., Антропов С.Н., Буйносов А.П. Расчет прочности тележки газотурбовоза как статически неопределимой системы // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 6. С. 20-23.
2. Буйносов А.П., Марулин С.Л. Результаты моделирования упрочнения деталей локомотивов при термической обработке // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 9. С. 51-54.
3. Буйносов А.П., Динисламов А.Р. Выбор метода неразрушающего контроля термоупрочненных деталей механической части электровозов // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 1. С. 50-52.
4. Буйносов А.П., Антропов С.Н. О концепции развития универсальной платформы для локомотивов нового поколения // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 3. С. 22-24.
5. Буйносов А.П., Лаптев С.И., Антропов С.Н. Организация эксплуатации газотурбинных локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 8. С. 10-13.
6. Буйносов А.П., Яковлев К.Н., Хваловский А.В. Влияние условий эксплуатации локомотивов на износ бандажей колесных пар // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 3. С. 46-49.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ (05.13.06)**

05.13.06

¹С.А. Канаев, ¹А.С. Конькова, ¹М.Ю. Молозина, ¹О.В. Москаленко,
²А.В. Торчинская канд. ф.-м. наук

МИРЭА – Российский технологический университет,
¹кафедра приборы и информационно-измерительные системы,
²кафедра оптических и биотехнических систем и технологий,
Москва, ksa.cnt@mail.ru, alexandrakonkova95@gmail.com, mkv35@mail.ru

**ЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК СТЕНДА КАЛИБРОВКИ И ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ
ПОРТАТИВНЫХ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИХ СПИРОГРАФОВ И
СПИРОАНАЛИЗАТОРОВ**

В статье представлен состав стенда калибровки и термокомпенсации спирографов и спироанализаторов. Приведены основные функции электронного блока стенда. Рассмотрены особенности его схемной и конструктивной реализации.

Ключевые слова: электронный блок, шаговый электропривод, калибровка и термокомпенсация, поверка, спирометры и спироанализаторы.

Основными средствами диагностики заболеваний бронхолегочной системы являются спирометры и спироанализаторы. Спирометры и спироанализаторы, реализованные на базе малоинерционных калориметрических датчиков воздушного потока, обладают рядом преимуществ перед аналогичными приборами других типов [1]. Главной проблемой их практического применения является необходимость индивидуальной калибровки и термокомпенсации датчиков воздушного потока в процессе производства [2]. В условиях серийного производства конкурентоспособность спирометров и спироанализаторов данного типа может быть обеспечена только при условии обеспечения высокой степени автоматизации процесса калибровки.

В рамках проводимых авторами работ в области разработки телемедицинских спирометров решается задача создания автоматизированных стендов для калибровки и термокомпенсации датчиков воздушного потока, а также вспомогательного оборудования, необходимого для их серийного производства.

Прототип стенда калибровки и термокомпенсации включает следующие основные элементы (Рис. 1): автоматизированный поршневой дозатор; электронный блок управления; персональный компьютер; изолированные источники питания для силовой части и электронного блока; комплект концевых датчиков (КД1-КД6) индуктивного типа [3].

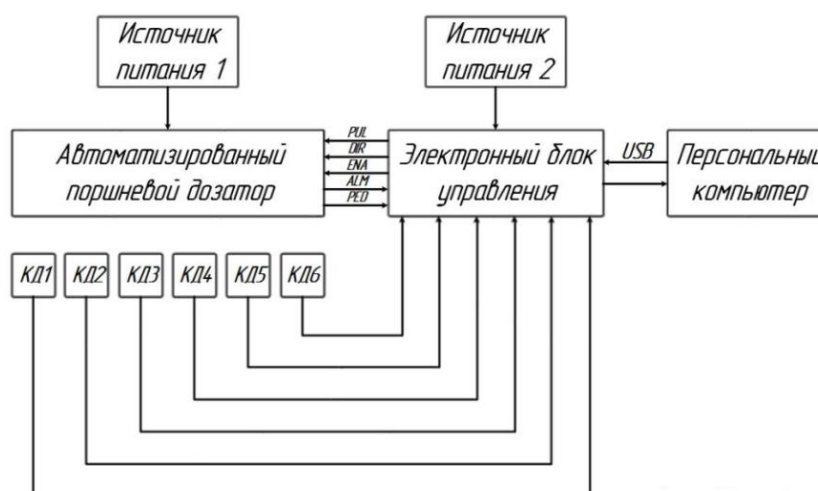


Рис. 1 – Структурная схема стенда калибровки и термокомпенсации

Автоматизированный поршневой дозатор включает воздушный поршневой насос; высокоскоростной прецизионный модуль линейного перемещения; сервошаговый электропривод.

Прототип стенда позволяет воспроизводить объемы воздуха до 14 литров с максимальной абсолютной погрешностью измерений $\pm 0,01$ литра и скорости воздушного потока до 25 м/с с пределом допускаемой абсолютной погрешности 0,5 м/с. Стенд может работать в двух режимах: калибровки датчиков воздушного потока и генератора пульмонологических сигналов.

В режиме калибровки стенд работает под управлением персонального компьютера. Режим калибровки используется в ходе серийного производства и проведения испытаний калориметрических датчиков воздушного потока. При условии размещения автоматизированного поршневого дозатора стенда в камере тепла и холода возможно формирование воздушных потоков с заданной температурой. В процессе калибровки для каждого датчика скорости воздушного потока необходимо получить семейство градуировочных характеристик при разных значениях температуры, произвести расчет калибровочных коэффициентов и сохранить их в энергонезависимую память спирометра или спироанализатора.

В режиме генератора пульмонологических сигналов стенд формирует воздушные потоки с профилем, соответствующим дыхательным маневрам характерным для людей с различными формами бронхолегочных заболеваний.

Электронный блок является важнейшим элементом стенда. Он реализует следующие основные функции:

- получает от управляющего персонального компьютера командный файл, содержащий полную информацию о параметрах движения поршня автоматического дозатора в процессе формирования воздушного потока с заданным профилем;
- осуществляет автоматическую проверку целостности файла с помощью алгоритма CRC16 и корректность команд содержащихся в файле;
- проводит установку поршня в исходное состояние при включении питания и в начале формирования нового профиля;
- с помощью шести концевых датчиков контролирует и предотвращает аварийные ситуации в ходе перемещения поршня;
- формирует управляющую последовательность импульсов для контроллера сервошагового привода;
- контролирует аварийные сигналы сервошагового привода ("проскальзывание" и "перегрузка");
- в процессе формирования воздушного потока осуществляет обмен управляющей информацией с персональным компьютером.

К электронному блоку предъявляется ряд специфических требований. Для обеспечения высокой плавности хода поршня необходимо использовать микрошаговые режимы сервошагового электропривода с высоким коэффициентом дробления шага. Применяемый в прототипе станда сервошаговый привод iES iES-2320 (ISS57-20) фирмы Leadshine Technology Co позволяет получить приемлемые значения коэффициента дробления шага в пределах от 800 до 51200 шагов на оборот. При высоких коэффициентах дробления шага приемлемую скорость перемещения поршня дозатора можно обеспечить только при достаточно высокой частоте управляющих импульсов, поступающих на блок сервошагового привода (до 500 кГц). В результате схема формирования импульсов электронного блока должна иметь помимо высокой нагрузочной способности, высокое быстродействие и помехоустойчивость.

Другими важными задачами является исключение перемещения поршня за границы рабочей зоны во всех режимах работы (с целью предотвращения разрушения механических элементов станда) и обнаружение эффекта "проскальзывания" в сервошаговом приводе.

Электронный блок станда калибровки и термокомпенсации включает следующие основные элементы (Рис. 2):

- микроконтроллер ATmega1280V-16AI фирмы Atmel;
- схему сброса при включении питания;
- гальванически развязанную версию интерфейса USB для связи с ПК;
- блок гальванически изолированных концевых датчиков;
- гальванически изолированную сборку транзисторных ключей для формирования управляющих импульсов сервошагового привода;
- блок входных оптронных ключей для подключения аварийных выходов сервошагового привода;
- разъемы для внутрисхемного программирования и отладки микроконтроллера (JTAG и ISP).

В схеме реализована двухуровневая гальваническая развязка для снижения влияния помех и наводок, формируемых силовой частью станда на блок управления, цепи концевых датчиков и управляющий ПК. Интерфейс USB, каналы для подключения датчиков (в том числе концевых выключателей) и блок сопряжения с силовым модулем электропривода гальванически развязаны между собой. Питание блоков транзисторных ключей и концевых датчиков осуществляется посредством DC-DC преобразователя с гальванической развязкой входных и выходных цепей (Рис. 2).

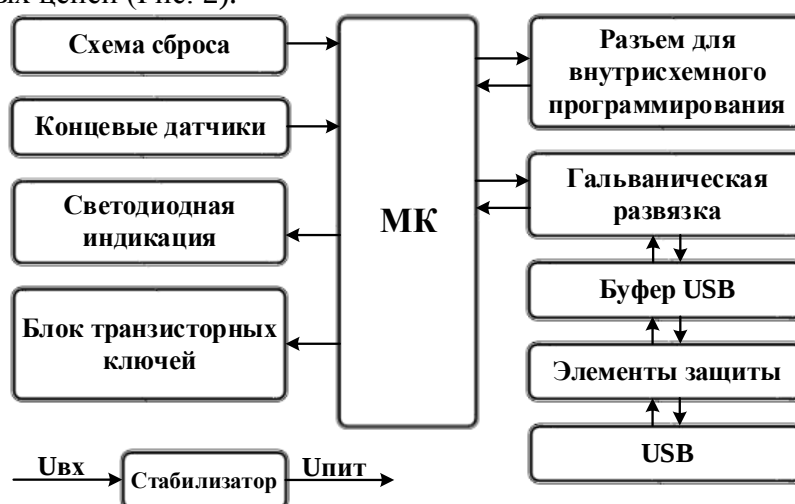


Рис. 2 – Структурная схема электронного блока управления стандом

Интерфейс USB реализован с применением технологии виртуального COM-порта, с использованием микросхемы FT232RQ. Гальваническая развязка реализована с использованием цифровых изоляторов ADUM1201ARZ фирмы Analog Devices. Для защиты интерфейса от повреждения статическим электричеством в схеме используется сборка на базе TVS-диодов (Transient Voltage Suppressor).

Для гальванической изоляции блока транзисторных ключей и концевых датчиков используются высокоскоростные оптроны HCPL-063L-000E фирмы Avago Technologies.

Конструктивно все электронные компоненты размещены на двусторонней печатной плате (Рис. 3). Основное внимание в ходе разработки конструкции печатной платы уделялось компоновке компонентов с точки зрения требований электромагнитной совместимости, обеспечению требуемых значений зазоров между элементами проводящего рисунка гальванически развязанных участков печатной платы, обеспечению расчетных тепловых режимов силовых компонентов.

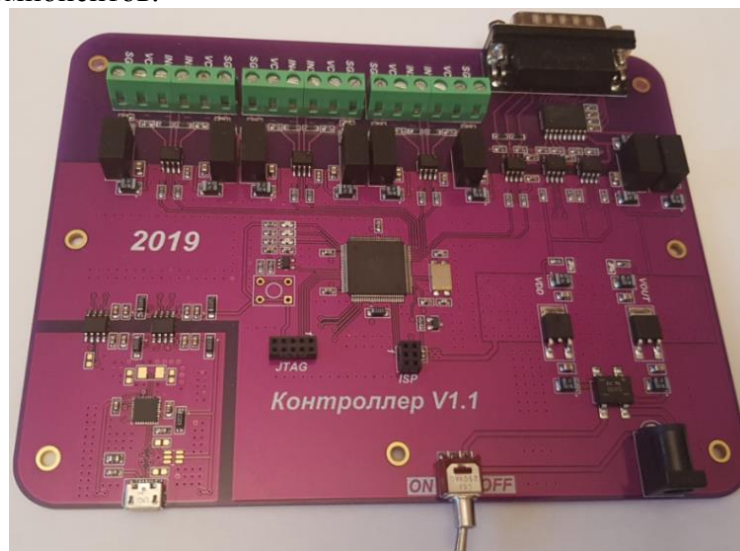


Рис. 3 – Внешний вид электронного блока станда

После сборки и отладки электронного блока были проведены его испытания, которые подтвердили правильность выбранных схемных и конструктивных решений, соответствие реальных рабочих параметров расчетным значениям. Для обеспечения требований электромагнитной совместимости был разработан комплект экранированных соединительных кабелей.

Электронный блок был испытан в составе экспериментального образца станда калибровки и термокомпенсации, реализованного на базе модуля линейных перемещений W60 CCM-W60-1100-1A фирмы PureLogic R&D и сервошагового электропривода iES iES-2320 (ISS57-20) фирмы Leadshine Technology Co., со сменным набором калибровочных шприцов. Испытания показали высокую надежность электронного блока и возможность воспроизведения с помощью станда, построенного на базе поршневого дозатора и шагового электропривода, объемов и скоростей воздушного потока с точностью, соответствующей требованиям к поверочному оборудованию.

Список литературы

1. Канаев С.А., Конькова А.С., Молозина М.Ю., Москаленко О.В., Торчинская А.В. Особенности аппаратно-программной реализации электронного блока для мобильного спирометрического комплекса // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: сборник трудов XXVI Междунар. научно-технич. конф.– Алушта, 2017. – С. 189–190
2. Канаев С.А., Конькова А.С., Молозина М.Ю., Москаленко О.В., Торчинская А.В. Проблемы автоматизации калибровки и диагностики в портативной спирографии // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: сборник трудов XXV Междунар. научно-технич. конф.– Алушта, 2016. – С. 83
3. Канаев С.А., Конькова А.С., Молозина М.Ю., Москаленко О.В., Торчинская А.В. Стенд для калибровки и термокомпенсации портативных спирографов и спироанализаторов // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: сборник трудов XXVI Междунар. научно-технич. конф.– Алушта, 2017. – С. 123–124

05.13.06

С.В. Леонтьев канд. техн. наук, П.Е. Бессонова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
строительный факультет,
кафедра строительного инжиниринга и материаловедения,
Пермь, bpe@cems.pstu.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СТРОИТЕЛЬНОГО КОНГЛОМЕРАТА МЕТОДОМ ДВУХФАКТОРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе представлены результаты корректировки функциональной модели газобетона автоклавного твердения с использованием метода планирования эксперимента. Описана технологическая схема использования «горбушного» шлама при изготовлении автоклавного газобетона. Выделены факторы, оказывающие влияние исследуемого отхода производства на основные характеристики готового продукта. Определено оптимальное содержание в газобетонной смеси «горбушного» шлама с учетом его плотности для получения необходимых эксплуатационных характеристик выпускаемой продукции.

Ключевые слова: *оптимизация, автоклавный газобетон, «горбушный» шлам, планирование эксперимента.*

Производство строительного конгломерата, состоящего из 4 и более компонентов, является сложным технологическим процессом, в котором задействовано множество факторов, таких как качество материалов и их расход, порядок загрузки компонентов в смеситель, время их перемешивания и пр. При этом изменение любого из факторов может повлечь за собой снижение качества выпускаемой продукции [1].

Для поддержания требуемого качества выпускаемой продукции на заводах внедряются различные системы поддержки принятия решений или автоматизированного управления производственным процессом [2]. Однако корректная работа таких систем сопряжена с качеством и универсальностью используемых в них математических моделей, для получения которых используют аналитические или экспериментальные методы [3, 4].

Учитывая постоянное ужесточение требований к качеству готового продукта, а также внедрение в современные технологические линии концепции «зеленого» и бережливого производства, использование метода планирования эксперимента, позволяющего корректировать имеющиеся или получать новые математические модели путем проведения небольшого количества промышленных экспериментов, представляется весьма эффективным.

Рассмотрим пример корректировки функциональной модели автоклавного газобетона с учетом вовлечения в производство собственных побочных продуктов – «горбушного» шлама (рис. 1).

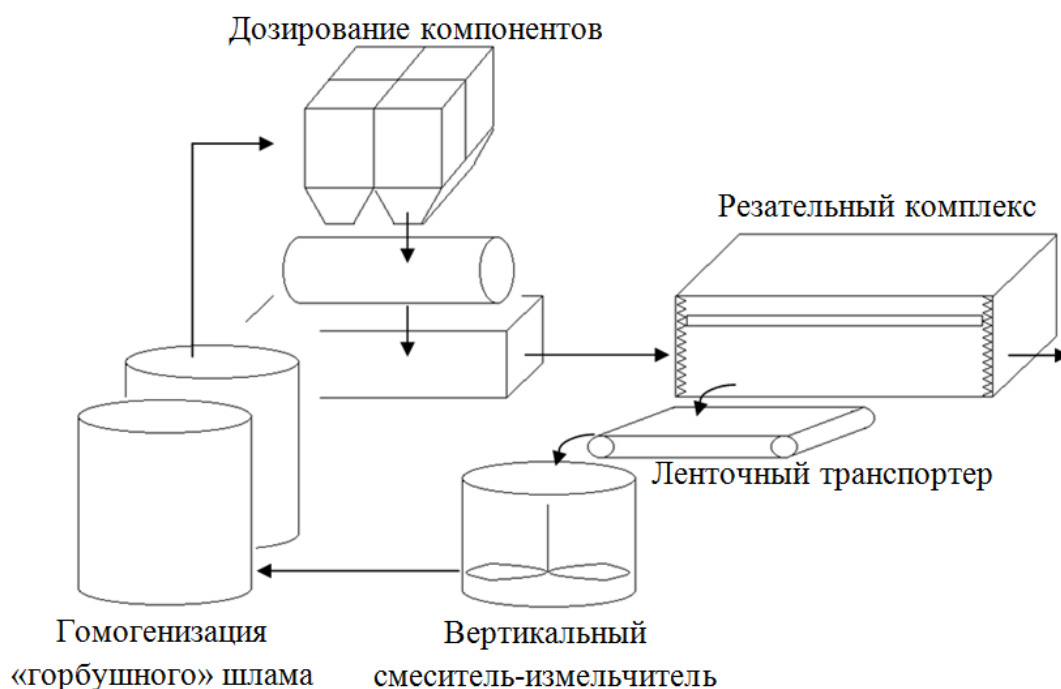


Рис. 1– Схема использования «горбушного» шлама в производстве газобетона автоклавного твердения

Как видно на рис. 1, отходы, полученные при калибровке массива и срезке верхнего «горбушного» и нижнего «подрезного» слоев, сбрасываются в приямок и с помощью ленточного транспортера подаются в смеситель-измельчитель отходов вертикального исполнения. Далее полученная при смешивании с водой суспензия («горбушный» шлам) подается в отделение гомогенизации, а затем - через расходные емкости в газобетоносмеситель.

В результате анализа литературных данных было установлено [5], что качество «горбушного» шлама оценивается по его вязкости, содержанию в нем твердой составляющей и тонкость ее измельчения. В свою очередь расход самого шлама оказывает влияние на качество газобетона: при введении «горбушного» шлама плотностью 1400 кг/м^3 в количестве 15-20% увеличивается прочность готового изделия, уменьшается время набора пластической прочности массива и улучшается его структура.

Поскольку вязкость «горбушного» шлама, содержание в нем твердой составляющей и тонкость ее измельчения прямо или косвенно связаны с плотностью шлама, поддержание которой в условиях динамичного производства на постоянном уровне затруднительно, то в качестве факторов были выбраны расход «горбушного» шлама ($G_{\text{Ш}}$) и его плотность ($\rho_{\text{Ш}}$).

Для изучения влияния выбранных факторов на текучесть (P) и время набора пластической прочности ($t_{\text{пл}}$), ячеистобетонной смеси, среднюю плотность (D), прочность при сжатии ($R_{\text{сж}}$) и теплопроводность (λ) автоклавного газобетона был проведен промышленный эксперимент по полному центральному ортогональному плану с изменением каждого фактора на трех уровнях. В качестве контрольного (K) был использован состав автоклавного газобетона D500 B2 без добавления «горбушного» шлама, изготавливаемый в четвертом пролете цеха ячеистого бетона завода АО «ПЗСП». Важно отметить, что для корректного сравнения результатов эксперимента «горбушный» шлам вводился взамен части песчаного шлама, при этом расход других компонентов и водотвердое отношение оставались неизменными.

План эксперимента и усредненные значения функций отклика в каждой точке плана представлены в табл. 1.

Таблица 1– План эксперимента и средние значения функций отклика в каждой точке плана

№ п.п.	Факторы		Среднее значение функций отклика				
	$\rho_{гш}, \text{кг/м}^3$	ГШ, %	P, см	$t_{пл}, \text{мин}$	D, кг/м ³	R _{сж} , МПа	$\lambda \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$
1	1350	5	42,5	196	473	2,64	0,095
2	1350	15	39,5	181	512	2,98	0,107
3	1350	25	38,3	157	536	3,13	0,133
4	1400	5	42	193	477	3	0,096
5	1400	15	38,2	169	520	3,36	0,118
6	1400	25	37,3	159	559	2,77	0,136
7	1450	5	36,9	188	492	2,93	0,111
8	1450	15	35,9	184	531	3,2	0,126
9	1450	25	33,7	168	566	3,18	0,138
K	-	-	36	215	497	2,92	0,112

Оценка полученных результатов осуществлялась в программном комплексе STATISTICA. При этом в качестве базовой была выбрана регрессионная модель с полными взаимодействиями. После анализа карт Парето и удаления незначимых коэффициентов уравнений регрессии, функциональную модель автоклавного газобетона в алгебраическом исполнении можно представить следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned}
 P &= -953,45 + 1,48 * \rho_{гш} - 0,00055 * \rho_{гш}^2 - 1,077 * ГШ + 0,0058 * ГШ^2 + 0,0005 * \rho_{гш} * ГШ \\
 t_{пл} &= 4547,9 - 6,1 * \rho_{гш} + 0,0021 * \rho_{гш}^2 - 14,5 * ГШ - 0,0117 * ГШ^2 + 0,0095 * \rho_{гш} * ГШ \\
 D &= -5,32 + 0,5175 * \rho_{гш} - 0,00013 * \rho_{гш}^2 - 2,9 * ГШ - 0,0383 * ГШ^2 + 0,0055 * \rho_{гш} * ГШ \\
 R_{сж} &= 60,179 - 0,085 * \rho_{гш} + 0,0000315 * \rho_{гш}^2 - 59,887 * ГШ + 2,785 * ГШ^2 + \\
 &+ 0,0857 * \rho_{гш} * ГШ - 0,00398 * \rho_{гш} * ГШ^2 - 0,0000306 * \rho_{гш}^2 * y + 0,00000142 * \rho_{гш}^2 * ГШ^2 \\
 \lambda &= 1,0968 - 0,00165 * \rho_{гш} + 0,0000007 * \rho_{гш}^2 + 0,0091 * ГШ + \\
 &+ 0,0000117 * ГШ^2 - 0,0000055 * \rho_{гш} * ГШ
 \end{aligned} \right.$$

Поиск оптимального решения, результаты которого представлены в табл. 2, проводился с использованием надстройки «Поиск решения» программного продукта Microsoft Office Excel в условиях следующих ограничений: распыл смеси должен быть от 36 до 38 см, средняя плотность газобетона – от 490 до 510 кг/м³, коэффициент теплопроводности – не более 0,12 Вт/м·К. В качестве целевой функции была выбрана прочность при сжатии готового продукта.

Таблица 2– Результаты решения задачи оптимизации состава автоклавного газобетона с содержанием «горбушного» шлама

№ состава	Факторы		Среднее значение функций отклика				
	$\rho_{гш}, \text{кг/м}^3$	ГШ, %	P, см	$t_{пл}, \text{мин}$	D, кг/м ³	R _{сж} , МПа	$\lambda \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$
1	1428	10,6	38	182	510	3,29	0,113
2	1436	7,9	38	186	500	3,14	0,111
3	1441	10	37	184	510	3,18	0,115

Графический анализ полученной функциональной модели автоклавного газобетона подтверждает результаты оптимизации его состава (рис. 2).

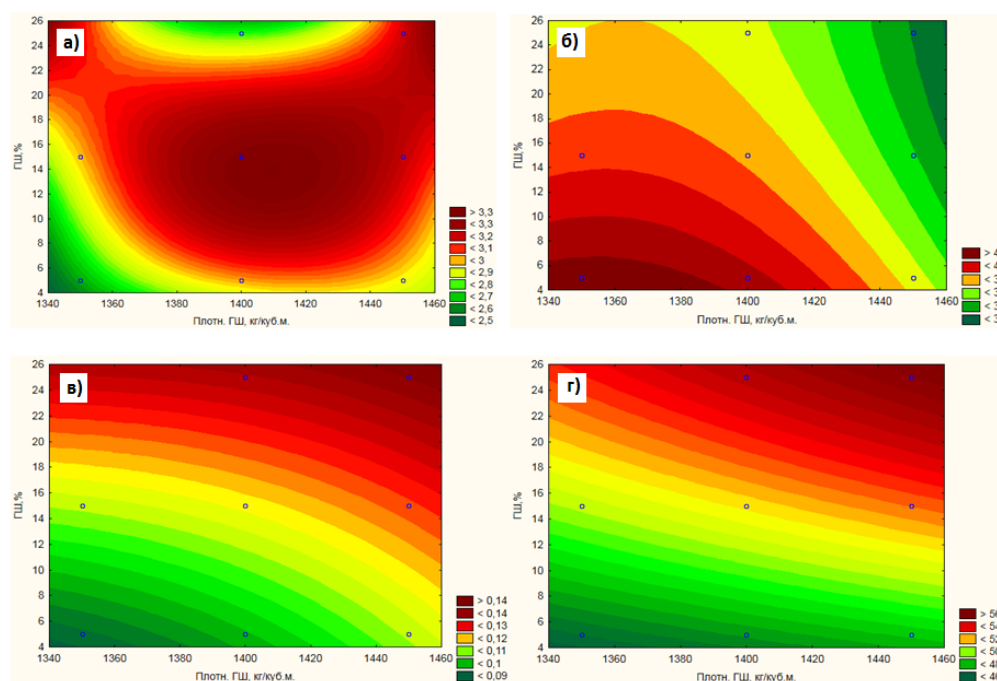


Рис. 2– Графическое представление функций отклика предела прочности при сжатии автоклавного газобетона (а), распыла смеси (б), теплопроводности (в) и средней плотности (г)

Из представленных на рис. 2 графиков видно, что увеличение содержания в ячеистобетонной смеси «горбушного» шлама в интервале от 8 до 12% при его плотности от 1420 до 1440 кг/м³ оказывает положительное влияние на эксплуатационные свойства автоклавного газобетона. Превышение оптимального расхода «горбушного» шлама способствует ухудшению реологических характеристик ячеистобетонного массива, что негативно сказывается на его структуре: увеличивается значение средней плотности и теплопроводности при незначительном повышении прочности при сжатии.

Список литературы

1. Орлов А.А., Леонтьев С.В., Курзанов А.Д. Экспериментальная оценка эффективности методики оптимизации технологического процесса производства неавтоклавного газобетона // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. - 2018. - №1(29). - С. 114-124.
2. Айсарина А.А., Недосеко И.В. Использование автоматизированных систем управления в промышленности // Известия Международной академии аграрного образования. - 2015. - №23. - С. 24-26.
3. Шаманов В.А. Математическая модель технологического процесса дозирования компонентов автоклавного газобетона // Научно-технический вестник Поволжья. - 2017. - №4. - С. 232-235.
4. Галицков С.Я., Иванов К.А., Назаров М.А., Сабанов П.А., Пименов Е.К. Математическое описание процесса подготовки керамической массы в двухвальном глиносмесителе как объекта управления // Научное обозрение. - 2014. - №6. - С. 84-89.
5. Морозова Н.Н., Кузнецова Г.В., Хозин В.Г. Подрезной слой и гидрофобизатор в производстве газобетона // Строительные материалы. - 2015. - №8. - С. 8-9.

05.13.06

В.А. Шаманов канд. техн. наук, М.А. Горкунова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
строительный факультет,
кафедра строительного инжиниринга и материаловедения,
Пермь, shamanov@cems.pstu.ru

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЬЮНКТУРЫ РЫНКА

В работе рассмотрены варианты управления качеством неавтоклавного газобетона с использованием механизмов комплексного оценивания. Показано, что неавтоклавный газобетон по комплексному показателю качества уступает газобетону автоклавного твердения. Для уравнивания позиций газобетона автоклавного и неавтоклавного твердения предлагаются различные варианты управления: путем изменения теплотехнических характеристик или эксплуатационных характеристик, включая конструктивное качество и долговечность материала.

Ключевые слова: газобетон, качество, комплексное оценивание, управление, конъюнктура.

Реализация на территории России государственной программы «Жилище» на 2016-2020 гг. предопределила развитие рынка стеновых материалов конструкционно-теплоизоляционного назначения, к которым можно отнести современные энергоэффективные и экологически безопасные ячеистые бетоны: пенобетоны и газобетоны автоклавного и неавтоклавного твердения. Однако если в 2010 году объем производства мелкоштучных стеновых блоков из ячеистого бетона автоклавного твердения (АГБ) превышал в 2.3 раза объем производства блоков из неавтоклавного газобетона (НГБ), то в 2015 году это соотношение снизилось до 1.65 [1].

Значительным стимулом увеличения объемов производства неавтоклавного газобетона, как в Пермском крае, так и в целом по России, послужило увеличение объемов монолитного и сборно-монолитного строительства, при котором наружные стены выполняют лишь ограждающие и теплоизолирующие функции.

На этом фоне на объектах малоэтажного и высотного строительства все чаще встречаются случаи подмены автоклавных газобетонных блоков неавтоклавными, характеризующимися, по мнению некоторых авторов, более низкими показателями качества [2].

К слову, для управления качеством строительных материалов различного назначения в настоящее время предлагаются разнообразные системы, позволяющие реализовывать функции поддержки принятия решений при планировании, организации, контроле и комплексном оценивании достигнутых результатов [3]. Однако основная проблема реализации процесса управления при изготовлении ячеистобетонных блоков заключается в большом количестве разнообразных показателей качества (функций отклика) и параметров управления, прямо или косвенно связанных между собой [4]. Кроме того, применительно к технологии производства НГБ, одновременное улучшение всех эксплуатационных характеристик потребует значительных временных и капитальных затрат на совершенствование технологии и проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ без каких-либо гарантий достижения положительного результата.

В этом случае выявление вариантов управления качеством неавтоклавного газобетона с учетом изменчивости конъюнктуры рынка и потребительских предпочтений за счет применения механизмов комплексного оценивания представляется актуальным.

В настоящее время на территории Пермского края выпускаются мелкие стеновые блоки из газобетона автоклавного (АО «ПЗСП» и АО «Пермтрансжелезобетон») и неавтоклавного (ООО «ПЗНГ», ООО «Бетарм», ООО «Кама-блок» и др.) твердения, основные эксплуатационные характеристики которых представлены в табл. 1.

Таблица 1– Основные показатели качества газобетона различных производителей Пермского края

Завод-изготовитель	Основные показатели качества				
	$\rho_{\text{ср}}$, кг/м ³	$R_{\text{сж}}$, МПа	F, цикл	$W_{\text{отп}}$, %	λ_0 , Вт/м·К
<i>Газобетон автоклавного твердения</i>					
АО «ПЗСП»	490	2.9	50	21	0.109
АО «ПТЖБ»	510	3.2	50	17	0.115
<i>Газобетон неавтоклавного твердения</i>					
ООО «Бетарм»	520	1.9	35	23	0.127
ООО «ПЗНГ»	510	2.1	50	24	0.123
ООО «ПЗГ»	570	1.9	50	24	0.142
ООО «Кама-блок»	570	1.6	35	27	0.135

Примечание: $\rho_{\text{ср}}$ – значение средней плотности, $R_{\text{сж}}$ – значение предела прочности при сжатии, F – марка по морозостойкости; $W_{\text{отп}}$ – значение отпускной влажности; λ_0 значение коэффициента теплопроводности в сухом состоянии.

Как можно наблюдать из данных табл. 1, газобетон неавтоклавного твердения по всем позициям несколько уступает АГБ. Однако, принимая во внимание, что при возведении наружных стен и внутренних перегородок зданий в пределах типового этажа высотой до 3 метров показатели прочности и морозостойкости газобетона уходят на второй план, позиции НГБ несколько укрепляются.

Рассмотрим варианты управления качеством неавтоклавного газобетона с использованием современных механизмов комплексного оценивания. В качестве объектов исследования выберем газобетон неавтоклавного твердения производства ООО «ПЗГ» и автоклавный газобетон производства АО «ПЗСП».

Дерево комплексного оценивания, матрицы бинарного агрегирования и методика проведения комплексного оценивания были приняты из ранее опубликованных исследований [5]. При этом функции приведения показателей качества газобетона к квалитетической шкале были приняты следующие (1-5):

$$\hat{Y}_{\rho_{\text{ср}}} = 0.0007\rho_{\text{ср}}^2 + 0.4095\rho_{\text{ср}} + 81.884, \quad (1)$$

$$\hat{Y}_{R_{\text{сж}}} = -0.0149R_{\text{сж}}^3 + 0.4348R_{\text{сж}}^2 - 1.526R_{\text{сж}} + 2.6425, \quad (2)$$

$$\hat{Y}_F = -0.0023F^2 + 0.2067F - 3.8462, \quad (3)$$

$$\hat{Y}_{W_{\text{отп}}} = 0.0034W_{\text{отп}}^2 + 0.2809W_{\text{отп}} + 6.8514, \quad (4)$$

$$\hat{Y}_{\lambda} = -2122\lambda^3 + 926.83\lambda^2 + 149.87\lambda + 10.122, \quad (5)$$

где $\hat{Y}_i$ – приведенное значение соответствующей физической величины.

Представим в табл.2 значения комплексного показателя качества неавтоклавного и автоклавного газобетона выбранных производителей.

Таблица 2– Приведенное значение показателей качества автоклавного и неавтоклавного газобетона

Факторы сравнения	АГБ АО «ПЗСП»	НГБ ООО «ПЗГ»
$\widehat{Y}_{\rho_{cp}}$	1.6	1.2
$\widehat{Y}_{R_{сж}}$	1.5	1.2
$\widehat{Y}_F$	2.0	2.0
$\widehat{Y}_{W_{отп}}$	2.4	2.0
$\widehat{Y}_{\lambda}$	2.0	1.5
Свертка «ККК»	1.5	1.25
Свертка «Экспл.»	1.5	1.3
Свертка «Комф.»	2.0	1.5
Компл. оценка	2.0	1.5

Как видно из табл. 2, значение комплексной оценки неавтоклавного газобетона ООО «ПЗГ» составит 1.5, а у блоков АО «ПЗСП» это значение равно 2.0. Отметим на «дереве» комплексного оценивания в матричном исполнении (рис. 1) позиции выбранных производителей мелкоштучных стеновых блоков из газобетона общестроительного назначения, и рассмотрим несколько вариантов управления качеством НГБ, при которых он получит комплексную оценку, равную 2.0.

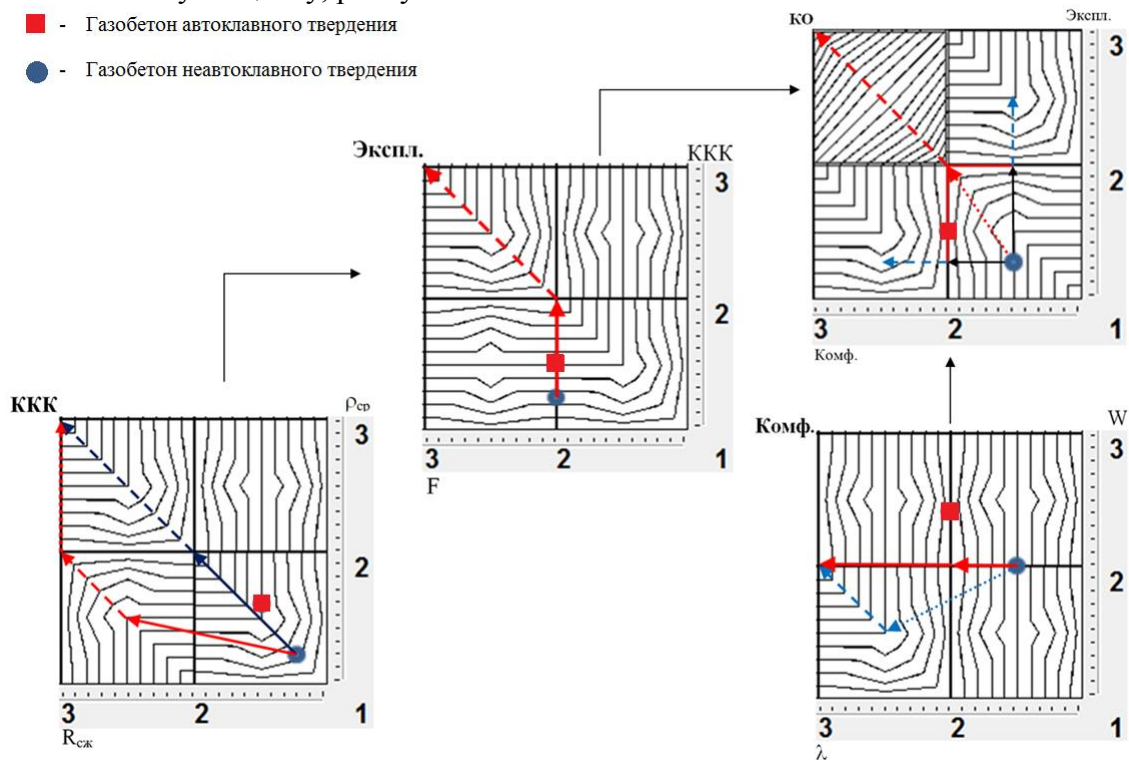


Рис. 1– «Дерево» комплексного оценивания качества газобетона

Как можно наблюдать на рис. 1, значение комплексного показателя качества газобетона в интервале от 1.0 до 3.0 в равной степени зависит от показателей комфортности (свертка «Комф.») и эксплуатационной надежности (свертка «Экспл.»). Для улучшения позиций НГБ возможно развитие как эксплуатационных характеристик, так и показателя комфортности. Однако в первом случае наибольшее значение комплексной оценки составит 2.5, а во втором – 2.3. Третий вариант предусматривает комплексное улучшение характеристик эксплуатационной надежности и комфортности.

Для улучшения характеристик комфортности необходимо, в первую очередь, снижать значение коэффициента теплопроводности, а для улучшения характеристик эксплуатационной надежности на начальном этапе требуется улучшение коэффициента конструктивного качества: за счет постепенного увеличения прочности при сжатии при одновременном снижении плотности, что позволит быстро уравнивать позиции конкурентов и обеспечить в последующем планомерное развитие НГБ; либо значительным повышением прочности при минимальном снижении плотности, что на современном этапе развития НГБ представляется весьма затруднительным.

Таким образом, для уравнивания позиций НГБ и АГБ рассматриваемых производителей с точки зрения комплексного критерия качества необходимо снизить значение коэффициента теплопроводности до отметки 0.12 Вт/м·К, а предпочтительнее – до 0.1 Вт/м·К, при этом обеспечить планомерное повышение прочности при сжатии и снижение средней плотности готового продукта до значений 2.15 МПа и 500 кг/м³ соответственно без снижения долговечности материала (уменьшения морозостойкости).

Список литературы

1. Стасилович Е.А., Касумов А.Ш. Перспективы производства ячеистого бетона // Современные наукоемкие технологии. – 2016. № – 8-1. – С. 77-80.
2. Данилов М.В., Чазова О.Л. Сравнительный анализ нормативных требований, предъявляемых к изделиям (блокам) из различных видов ячеистого бетона (газобетона и пенобетона) // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2014. – № 1. – С. 82-83.
3. Курзанов А.Д., Фомина М.А. Модель комплексного оценивания качества процесса структурообразования неавтоклавногазобетона // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 1. – С. 112-115.
4. Серова Р.Ф., Касумов А.Ш., Величко Е.Г. Проблемы производства и применения ячеистого бетона // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 7-2. – С. 267-271.
5. Харитонов В.А. [и др.]. Использование средств визуализации при оперативном управлении технологическим процессом производства композиционных строительных материалов // Научная визуализация. – 2018. – Т. 10. – №3. – С. 108-120. DOI: 10.26583/sv.10.3.08.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ (05.13.18)**

05.13.18

¹Е.В. Акиндинова канд. физ.-мат. наук, ²В.Е. Чернов д-р физ.-мат. наук,
³О.В. Зеткина канд. экон. наук

¹Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
кафедра математики,
Воронеж, lenaa83@mail.ru,

²Воронежский государственный университет,
кафедра математической физики,
Воронеж, wladislaw.chernov@gmail.com,

³Ярославский государственный университет им.П.Г. Демидова,
кафедра мировой экономики и статистики,
Ярославль

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РАСЧЕТАХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХАТОМНЫХ
НЕПОЛЯРНЫХ МОЛЕКУЛ**

В работе описан метод вычисления динамических поляризуемостей молекул. Рассмотрена реализация численного алгоритма с разделением интегралов по угловым и радиальным переменным.

Ключевые слова: *модель объединенного атома, поляризуемость, молекулярная орбиталь, двухатомные молекулы.*

Вычисление электромагнитных характеристик двухатомных молекул представляет значительный интерес, поскольку задачи связанные с ними, возникают в различных явлениях и областях физики. Это и молекулярная спектроскопия высокого разрешения, астрофизика, астрохимия. Характеристики играют важную роль при описании таких явлений, как рэлеевское рассеяние света, эффект Штарка, Керра, Фарадея.

В связи со сложностью систем, каковыми являются молекулы, расчет чаще всего проводится численно, с помощью методов вычислительной химии (*ab initio*). При этом известен круг моделей, различающихся между собой точностью, наиболее часто используемых при вычислениях: метод Хартри-Фока, теория функционала плотности, конфигурационного взаимодействия. Однако, эти методы приводят к ошибкам, например, при расчете динамической поляризуемости вблизи резонансной частоты, неточностям при описании высоковозбужденных состояний молекул или достаточно вычислительно затратные.

В данной работе используется известный метод теории квантового дефекта [1], который позволяет устранить ряд затруднений, возникающих в расчетах электромагнитных характеристик.

Постановка задачи. Рассматривается модель двухатомной молекулы в пределе объединенного атома. При этом считается, что взаимодействие молекулы с внешним полем сводится к переходам одного электрона (оптического) и одноэлектронный потенциал имеет кулоновскую форму. Данный факт позволяет получить точное решение уравнения Шредингера, соответственно, найти волновую функцию оптического электрона. При этом учитывается влияние остова на оптический электрон за счет использования экспериментального спектра при вычислениях. Кроме того, поскольку возникают трудности

при описании низколежащих состояний молекул, то для них используются *ab initio* методы, дающие хорошую точность для этих состояний. Таким образом, объединяются преимущества двух методов: описание вычислительными методами низковозбужденных состояний и аналитическое описание высоковозбужденных и непрерывных состояний, по аналогии как это было сделано для атомов [2].

В работе [3] вычислены значения частотно-зависимых поляризуемостей для ряда неполярных молекул. Численная реализация алгоритма осуществлялась в пакете Mathematica и программе Gaussian с использованием известных спектроскопических правил.

В настоящей статье рассматривается модификация алгоритма счета, с предварительным выводом ряда аналитических формул, которые позволяют получить в данном методе известные в молекулярной спектроскопии правила отбора, то есть тем самым подтвердить используемую модель, а также сокращают время счета. Вычисляются по этому алгоритму динамические поляризуемости, проводится сравнение результатов с работой [3], и считается сечение рэлеевского рассеяния для молекулы водорода.

Общие теоретические основы метода. В основе лежит использование аппарата функции Грина. Уравнение Шредингера на функцию Грина записывается в виде

$$\{H - E\}G(E, r, r') = \delta(r - r'), \quad H = -\frac{1}{2}\nabla^2 + U(r) - \frac{Z}{r}. \quad (1)$$

Здесь E – виртуальная энергия электрона, $U(r)$ представляет собой короткодействующий потенциал, то есть равный нулю за пределами молекулярного остова. Это объясняется тем, что для двухатомных молекул, не являющихся полярными, потенциал образуют высшие мультипольные моменты остова. В теории квантового дефекта ридберговские состояния молекул характеризуются орбитальным моментом электрона l и его проекцией m на ось молекулы, n нумерует спектральные серии. Поскольку формализм используется для ридберговских и непрерывных состояний, то в силу симметрии можно разделить угловые и радиальные переменные в уравнении (1) при r , больших радиуса остова. В частности, раскладывая функцию Грина по сферическим гармоникам:

$$G^{QD}(E, \mathbf{r}, \mathbf{r}') = \sum_{lm} g_{lm}^{QD}(E, r, r') Y_{lm}(r) Y_{lm}^*(r'),$$

получаем уравнение на $g_{lm}^{QD}(E, r, r')$:

$$\left\{ \frac{1}{2r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d}{dr} \right) - \frac{l(l+1)}{2r^2} + \frac{Z}{r} + E \right\} g_{lm}^{QD}(E, r, r') = \frac{1}{rr'} \delta(r - r'). \quad (2)$$

Решение уравнения (2) выражается [2] через функции Уиттекера:

$$g_{lm}^{QD}(E, r, r') = \frac{\nu}{Zrr'} \frac{\Gamma(l+1-\nu)}{\Gamma(l+1+\nu)} W_{\nu, l+1/2} \left(\frac{2Zr_{>}}{\nu} \right) \times \\ \times \left[\frac{\Gamma(l+1+\nu)}{\Gamma(2l+2)} M_{\nu, l+1/2} \left(\frac{2Zr_{<}}{\nu} \right) + \frac{\sin \pi(\mu_{lm} + l)}{\sin \pi(\mu_{lm} + \nu)} \frac{\Xi_{lm}(E)}{\Pi_{lm}(\nu)} W_{\nu, l+1/2} \left(\frac{2Zr_{<}}{\nu} \right) \right]; \\ \Pi_{lm}(\nu) = \nu^{2t} \left[\prod_{k=0}^{t-1} (k + \mu_{lm} + \nu)(k + 1 - \mu_{lm} - \nu) \right]^{-1}, \quad \nu = 1/\sqrt{-2E}, \quad (3)$$

здесь $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция Эйлера, μ_{lm} – функция квантового дефекта.

Число t выбирается для устранения полюсов, $|nlm\rangle$ состояний, которые заняты электронами остова или таких, что $n < l+1$. Функция энергии $\Xi_{lm}(E)$ восстанавливается по ее значениям в дискретном множестве точек, соответствующих экспериментальным энергетическим уровням:

$$\Xi_{lm}(E_{nlm}) = \Pi_{lm}(n), \quad n \geq l+1. \quad (4)$$

В результате применения указанных условий функция Грина (3) будет иметь полюса в точках, соответствующих экспериментальным значениям E_{nlm} .

Дипольную динамическую поляризуемость системы, которая состоит из p_s эквивалентных оптических электронов, в квантовом состоянии $|s\rangle$, можно вычислить через одноэлектронную функцию Грина [3]:

$$\alpha_{ij}(\omega) = p_s \langle s | D_i G(E_s + \omega) D_j + D_j G(E_s - \omega) D_i | s \rangle. \quad (5)$$

В этой формуле $i, j = x, y, z$; $\mathbf{D} = \mathbf{r}$ или $\mathbf{r}'$. Функция Грина может быть представлена в виде суммы спектрального разложения по дискретным $|d\rangle$ и непрерывным $|c\rangle$ состояниям:

$$G(E, r, r') = \sum_d \frac{\Psi_d^*(r') \Psi_d(r)}{E - E_d} + \int dE_c \frac{\Psi_c^*(r') \Psi_c(r)}{E - E_c}. \quad (6)$$

Как было замечено выше, для правильного описания динамики молекулярных электронов волновые функции высоковозбужденных состояний и непрерывных строятся по методу теории квантового дефекта. Для основного и нескольких N возбужденных состояний необходимо использовать *ab initio* методы. Выбор N обусловлен сходимостью процедуры замещения. В результате для формулы (6) будем иметь:

$$G(E, r, r') = G^{QD}(E, r, r') - \sum_{d=0}^{N-1} \frac{\Psi_d^{QD*}(r') \Psi_d^{QD}(r)}{E - E_d} + \sum_{d=0}^{N-1} \frac{\Psi_d^{CC*}(r') \Psi_d^{CC}(r)}{E - E_d}. \quad (7)$$

В работе алгоритм счета строился для диагональных компонент тензора динамической поляризуемости:

$$\begin{aligned} \alpha_{ii}(\omega) = & \alpha_{ii}^{QD}(\omega) - p_0 \sum_{\substack{nlm \\ Nfirstlevels}} \left(\frac{|\langle 0 | D_i | nlm \rangle|^2}{E_0 - E_{nlm} - \omega} + \frac{|\langle 0 | D_i | nlm \rangle|^2}{E_0 - E_{nlm} + \omega} \right) + \\ & + p_0 \sum_{d=0}^{N-1} \left(\frac{|\langle 0 | D_i | d \rangle|^2}{E_0 - E_d - \omega} + \frac{|\langle 0 | D_i | d \rangle|^2}{E_0 - E_d + \omega} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

При этом $i = x$ или y для перпендикулярной и $i = z$ для параллельной компонент поляризуемости, $\langle 0 |$ - основное состояние.

Существуют различные дипольные молекулярные свойства, относящиеся к средней поляризуемости $\alpha = \frac{1}{3}(2\alpha_{xx} + \alpha_{zz})$ и ее компонентам α_{xx} , α_{zz} . Например, сечение рэлеевского рассеяния. Формула для сечения рассеяния, как известно, имеет вид [4]:

$$Q_{Ray}(\omega) = \frac{128\pi^4}{9\lambda^4} (3\alpha^2(\omega) + \frac{2}{3}\gamma^2(\omega)).$$

Реализация алгоритма и результаты. В [3] расчеты были выполнены без отделения угловых и радиальных переменных при вычислении матричных элементов по формуле (8). Для значения r с определенным шагом вычислялись интегралы по угловым переменным, а далее проводилась процедура интерполяции функции зависящей от r , что и приводило к временным затратам.

Преобразуем формулу (5) путем разделения угловой и радиальной части. Согласно формуле (5) для расчета компонент α_{xx} и α_{zz} требуется вычисление матричных элементов вида

$$\begin{aligned} & \langle \Psi_0(\vec{r}) | x \sum_{l,m} g_{lm}^{QD}(E, r, r') Y_{lm}(\vec{r}) Y_{lm}^*(\vec{r}') x' | \Psi_0(\vec{r}') \rangle \text{ и} \\ & \langle \Psi_0(\vec{r}) | z \sum_{l,m} g_{lm}^{QD}(E, r, r') Y_{lm}(\vec{r}) Y_{lm}^*(\vec{r}') z' | \Psi_0(\vec{r}') \rangle. \end{aligned}$$

Одноэлектронная волновая функция основного состояния рассчитывается в программе Gaussian. В данном случае молекулярная орбиталь в методе Хартри-Фока-Рутана записывается как линейная комбинация одноэлектронных функций, известных как базисные функции. Эти базисные функции обычно центрированы на атомном ядре и поэтому

напоминают атомные орбитали. Одна молекулярная орбиталь определяется выражением: $\phi_i = \sum_{\gamma} c_{\gamma i} \varphi_{A\gamma}$, где коэффициенты $c_{\gamma i}$ называются коэффициентами разложения молекулярных орбиталей [5].

Каждая атомная функция φ_A центрированная на определенном ядре A , имеет вид $\varphi_{A\gamma}(\vec{r} - \vec{r}_A) = \sum_s a_{s\gamma} g_s$, где $g_s = c_s x^n y^u z^v e^{-\alpha(\vec{r} - \vec{r}_A)^2}$. Для разделения радиальной и угловой части

x, y, z выражаем через сферические функции по формулам: $x = r \sqrt{\frac{2\pi}{3}} (Y_{1-1} - Y_{11})$,
 $y = ir \sqrt{\frac{2\pi}{3}} (Y_{1-1} + Y_{11})$, $z = r \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Y_{10}$.

Кроме того, для $e^{-\alpha(\vec{r} - \vec{r}_A)^2} = e^{-\alpha r^2} e^{-\alpha r_A^2} e^{2\alpha \vec{r} \vec{r}_A}$ воспользуемся разложением по сферическим функциям [6]:

$$e^{2\alpha \vec{r} \vec{r}_A} = \sum_{p=0}^{\infty} f_p(2\alpha r r_A) Y_p(\Omega) Y_p(\Omega_A) = \sum_{p=0}^{\infty} f_p(2\alpha r r_A) \sum_{m=-p}^p Y_{pm}^*(\Omega) Y_{pm}(0, \varphi).$$

Здесь был использован тот факт, что молекула линейная, ось z направлена по оси двухатомной молекулы. Тогда получим:

$$e^{2\alpha \vec{r} \vec{r}_A} = \sum_{p=0}^{\infty} f_p(2\alpha r r_A) Y_{p0}^*(\Omega) \delta_{m0} \sqrt{\frac{2p+1}{4\pi}} = \sum_{p=0}^{\infty} f_p(2\alpha r r_A) Y_{p0}(\Omega) \sqrt{\frac{2p+1}{4\pi}}$$

При этом коэффициенты разложения согласно [6] определяются выражением

$$f_p(2\alpha r r_A) = 4\pi \sum_{n=p, p+2}^{\infty} \frac{(2\alpha r r_A)^n}{(n-p)!!(n+p+1)!!} \quad (9)$$

Введем $2k=n-p$ и преобразуем формулу (9):

$$f_p(2\alpha r r_A) = 4\pi \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2\alpha r r_A)^{2k+p}}{(2k)!!(2(k+p)+1)!!} = 4\pi \sqrt{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2\alpha r r_A)^{2k+p}}{2^k k! 2^{k+p+1} \Gamma(k+p+\frac{3}{2})};$$

$$f_p(2\alpha r r_A) = 2\pi \sqrt{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(r r_A)^{2k+p}}{k! \Gamma(k+p+\frac{3}{2})} = \frac{2\pi \sqrt{\pi}}{\sqrt{r r_A}} I_{p+1/2}(2\alpha r r_A).$$

Здесь $I_{p+1/2}$ - модифицированная функция Бесселя первого рода.

Таким образом, волновую функцию, вычисленную в программе Gaussian можно представить в виде $\Psi(\vec{r}) = \sum_{p=0}^{\infty} R_p(r) \tilde{Y}_p(\theta, \varphi)$ (вид $\tilde{Y}_p(\theta, \varphi)$ зависит от множителей перед экспонентой). В свою очередь, формула для расчета компонент поляризуемости будет иметь вид:

$$\alpha_{zz} = \sum_{p,k=0}^{\infty} \sum_{l,m} \langle R_p(r) | r g_{lm}^{QD}(E, r, r') r' | R_k(r') \rangle \langle \tilde{Y}_p(\theta, \varphi) | Y_{10}(\theta, \varphi) | Y_{lm}(\theta, \varphi) \rangle \times$$

$$\times \langle Y_{lm}(\theta', \varphi') | Y_{10}(\theta', \varphi') | \tilde{Y}_k(\theta', \varphi') \rangle,$$

$$\alpha_{xx} = \sum_{p,k=0}^{\infty} \sum_{l,m} \langle R_p(r) | r g_{lm}^{QD}(E, r, r') r' | R_k(r') \rangle \langle \tilde{Y}_p(\theta, \varphi) | Y_{1-1}(\theta, \varphi) - Y_{11}(\theta, \varphi) | Y_{lm}(\theta, \varphi) \rangle \times$$

$$\times \langle Y_{lm}(\theta', \varphi') | Y_{1-1}(\theta', \varphi') - Y_{11}(\theta', \varphi') | \tilde{Y}_k(\theta', \varphi') \rangle,$$

где $R_p(r) \sim r^{n+u+v} e^{-\alpha r^2} e^{-\alpha r_A^2} \frac{2\pi \sqrt{\pi}}{\sqrt{r r_A}} I_{p+1/2}(2\alpha r r_A)$.

Далее в программе отдельно выполняется вычисление интегралов по переменным θ, φ и отдельно по r . Вопрос, связанный с суммированием по p и k удается решить, проанализировав интегралы от сферических функций.

При аналитическом вычислении интегралов по угловым переменным возникают ограничения на значения p (k) и сумма по ним перестает быть бесконечной, а зависит от значений l . Покажем это.

Волновые функции рассматриваемых в работе неполярных двухатомных молекул содержат слагаемые следующих видов: $c_s e^{-\alpha(r-r_A)^2}$, $c_s z e^{-\alpha(r-r_A)^2}$, $c_s z^2 e^{-\alpha(r-r_A)^2}$. Для параллельной компоненты частотной поляризуемости требуется вычисление угловых матричных элементов трех типов:

$$\begin{aligned} 1) & \langle Y_{p0}(\theta, \varphi) | Y_{10}(\theta, \varphi) | Y_{lm}(\theta, \varphi) \rangle; \\ 2) & \langle Y_{10}(\theta, \varphi) Y_{p0}(\theta, \varphi) | Y_{10}(\theta, \varphi) | Y_{lm}(\theta, \varphi) \rangle; \\ 3) & \langle Y_{10}(\theta, \varphi) Y_{10}(\theta, \varphi) Y_{p0}(\theta, \varphi) | Y_{10}(\theta, \varphi) | Y_{lm}(\theta, \varphi) \rangle. \end{aligned}$$

В первом случае получим:

$$\int Y_{lm}(\theta, \varphi) Y_{p0}(\theta, \varphi) Y_{10}(\theta, \varphi) d\Omega = \sqrt{\frac{(2l+2)(2p+1)}{12\pi}} C_{10p0}^{10} C_{l-mp0}^{10}.$$

То есть $m=0$ – вклад дают Σ - состояния и $p = l \pm 1$ (здесь C – коэффициенты Клебша-Гордона).

Во втором случае:

$$\begin{aligned} & \langle Y_{10}(\theta, \varphi) Y_{p0}(\theta, \varphi) | Y_{10}(\theta, \varphi) | Y_{lm}(\theta, \varphi) \rangle = \\ & = \frac{\sqrt{(2l+1)(2p+1)}}{10\pi} C_{10p0}^{20} C_{l-mp0}^{20} (\delta_{p,l} + \delta_{p,l\pm 2}) + \frac{1}{4\pi} \delta_{p,l} \delta_{m,0}. \end{aligned}$$

Снова $m=0$, а для p условия $p = l \pm 2$ и $p = l$. В третьем случае:

$$\begin{aligned} & \langle Y_{10}(\theta, \varphi) Y_{10}(\theta, \varphi) Y_{p0}(\theta, \varphi) | Y_{10}(\theta, \varphi) | Y_{lm}(\theta, \varphi) \rangle = \\ & = (C_{10p0}^{30} C_{l-mp0}^{30} (\delta_{p,l\pm 1} + \delta_{p,l\pm 3}) \frac{1}{7} + \frac{1}{2} C_{10p0}^{10} C_{l-mp0}^{10} \delta_{p,l\pm 1}) \delta_{m,0} \frac{3\sqrt{3(2l+1)(2p+1)}}{20\pi\sqrt{\pi}}. \end{aligned}$$

В сумме по p остается конечное число слагаемых, причем их значения зависят от величины l .

Проведя аналогичные расчеты для перпендикулярной компоненты поляризуемости получаем $m = \pm 1$, значения p (k) ограничены величинами $l, l \pm 1, l \pm 2, l \pm 3$. То есть и в этом случае в используемой модели подтвердилось правило отбора, что в α_{xx} вклад дают П-состояния молекул.

Расчет радиальной части сводился к решению систем дифференциальных уравнений и также выполнялся в пакете Mathematica.

Реализация измененного алгоритма была проведена для тех же неполярных молекул, что и в работе [3]. В таблице 1 приведены результаты для ряда значений частоты ω перпендикулярной компоненты дипольной поляризуемости молекул Na_2 и Rb_2 . Для сравнения там же даны результаты предыдущих вычислений. Разница имеет порядок 10^{-2} - 10^{-3} , однако время численного счета сократилось.

Используя модифицированный алгоритм, были вычислены значения сечения рэлеевского рассеяния для молекулы H_2 . Результаты для различных длин волн λ представлены в таблице 2. Проведено сравнение с данными из других источников [7,8]. В частности, небольшое отличие от результатов, вычисленных с помощью метода приближения случайной фазы [7] и большее от [8] объясняется тем, что в работе [8] проведено усреднение по колебательным и вращательным состояниям, а в данном методе и [7] расчеты выполнялись при фиксированном межъядерном расстоянии.

Таблица 1- Значения α_{xx} (в атомных единицах).

ω	0	0.012	0.036	0.06	0.072	0.084
Na ₂	209.098	212.712	246.086	354.873	511.637	1112.08
Na ₂ [3]	209.099	212.713	246.087	354.873	511.639	1112.08
ω	0	0.01	0.03	0.05	0.06	0.065
Rb ₂	402.127	411.155	501.378	899.534	2021.342	7229.860
Rb ₂ [3]	402.130	411.160	501.381	899.533	2021.340	7229.850

Таблица 2- Сечение рэлеевского рассеяния для H₂ (в 10⁻²⁷ см²).

λ (нм)	632.8	546.23	435.96	334.24	275.36	193.58
Q _{Ray}	0.513	0.935	2.3172	7.267	16.892	87.916
Q _{Ray} [7]	0.523	0.953	2.42	7.42	17.3	90.2
Q _{Ray} [8]	0.566	1.034	2.628	8.09	18.91	100.5

Выводы: Выполнено усовершенствование алгоритма вычисления динамических поляризуемостей двухатомных неполярных молекул. Обоснованы правила отбора используемые в модели объединенного атома, известные в молекулярной спектроскопии. Благодаря разделению в аналитическом виде угловых и радиальных переменных сокращено время счета.

Список литературы

1. Seaton M.J., Quantum defect theory / M.J Seaton // Rep. Prog. Phys. – 1983. – V.46. – P.167-257.
2. Chernov V.E., Method of reduced-added Green function in the calculation of atomic polarizabilities / V.E. Chernov, D.L. Dorofeev, I.Yu. Kretinin, and B.A. Zon // Phys. Rev. A – 2005. V.71. – P.022505 (1-11).
3. Akindinova E.V., Molecular polarizability in quantum defect theory: Nonpolar molecules / E.V. Akindinova, V.E. Chernov, I. Yu. Kretinin and B.A. Zon // Phys. Rev. A – 2009. V.79. – P.032506 (1-9).
4. Ford A. L., Direct-Resolvent-Operator Computations on the Hydrogen-Molecule Dynamic Polarizability. Rayleigh, and Raman Scattering / A.L. Ford, J.C. Browne // Phys. Rev. A – 1973. V.7. – P.418-426.
5. Фудзинага С. Метод молекулярных орбиталей – М.: Мио, 1983. – 461 с.
6. Варшалович Д.А. Квантовая теория углового момента/ Д.А. Варшалович, А.Н. Москалев, В.К. Херсонский – Ленинград: Наука, 1975. – 441 с.
7. Martin P.H. S., Dipole properties of atoms and molecules in the random phase approximation / P.H. S. Martin, W.H. Henneker, V. McKoy // J.Chem.Phys. – 1975. –V.62. – P.69-79.
8. Kumar A., Constrained anisotropic dipole oscillator strength distribution techniques, and reliable results for anisotropic and isotropic dipole molecular properties, with applications to H₂ and N₂ / A. Kumar, W.J. Meath // Theor. Chim. Acta – 1992.- V.82. – P.131-152.

05.13.18

¹И.Р. Бадертдинов, ¹И.Л. Кузнецов д-р техн. наук,
^{2,3}Л.С. Сабитов канд. техн. наук, ²Л.Ш. Ахтямова

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,

²Казанский (Приволжский) федеральный университет,

³Казанский государственный энергетический университет,
 Казань, l.sabitov@bk.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ УПРУГО ОПЁРТЫХ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО СЕЧЕНИЯ РЕШЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ БАШЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

Авторами предложены уравнения для расчета на устойчивость и прочность тонкостенных стержней открытого сечения с шарнирным опиранием торцов обобщаются на задачи с граничными условиями, соответствующими упругому взаимодействию с соседними элементами конструкции. Данная методика реализована в авторском программном комплексе AutoRSS.05.

Ключевые слова: тонкостенные стержни, опоры переменного сечения, напряженно-деформированное состояние стержня переменного сечения, устойчивость стержня.

Рост применения легких стальных конструкций позволяет при снижении массы обеспечивать их высокую несущую способность и жесткость, однако при этом возрастает роль расчета на устойчивость упруго опертых тонкостенных стержней открытого сечения [1, 3-6].

Наиболее распространенными вариантами упругого закрепления стержней в решетчатых конструкциях башенных сооружений являются представленные на рисунке 1 схемы: а) один конец стержня жестко заделан, другой упруго закреплен и б) оба конца стержня упруго заделаны.

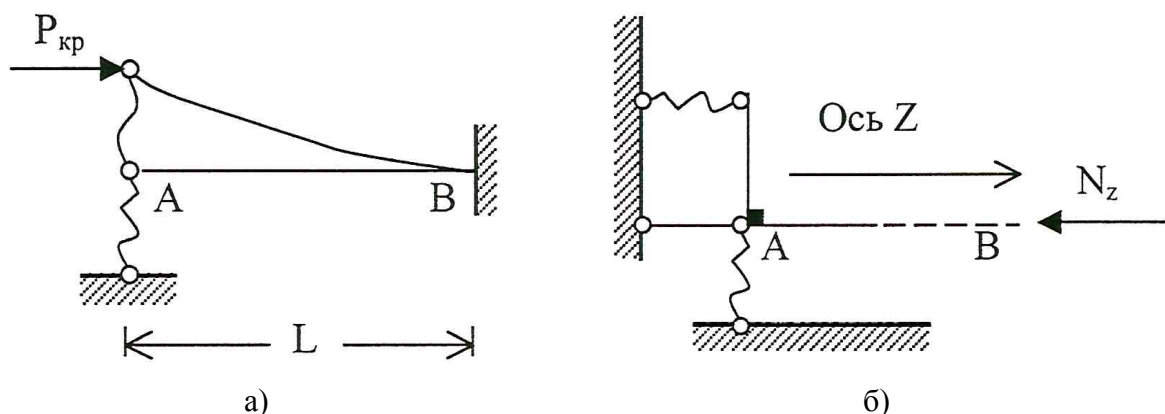


Рис. 1. Схемы упругого закрепления стержней открытого сечения решетчатых конструкций башенных сооружений

На рисунке 1, а показан стержень АВ, длиной L, правый конец которого жестко зашпелен, а левый конец А упруго взаимодействует с соседним элементом конструкции.

Рассмотрим первый вариант (рисунок 1а). При сжатии стержня АВ критической силой $P_{кр}$ уравнение его устойчивости можно записать в виде:

$$EJ_x \cdot v''(z) + pv(z) = +C_1 z + C_2, \quad (1)$$

где E – модуль упругости стержня; J – минимальный момент инерции стержня; $v(z)$ – зависимость вертикального перемещения стержня от z; C1 и C2 – константы интегрирования.

При вертикальном перемещении точки А возникает вертикальная поперечная сила Q_A , пропорциональна отклонению V_A :

$$Q_A^{(1)} = k_{1A} \cdot V_A,$$

где k_{1A} – коэффициент упругости опоры А.

Для определения критической силы $P_{кр}$ в наиболее распространённых случаях упругого закрепления стержней (рисунок 1) была предложена численно-аналитическая методика решения уравнения (1) устойчивости стержня, реализованная в своем индивидуальном программном комплексе авторской разработки AutoRSS.05 [2].

При решении тестовой задачи (Рисунок 1а) полагаем для определенности, что коэффициент жесткости стержня $k_{2A} = EF/L$, где модуль упругости стержня $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, длина $L = 0.1$ м; площадь сечения стержня $F = 8$ см².

В таблице 1 приведены полученные значения критических сил $P_{кр}$, при этом жесткость опоры k_{2A} изменялась в расчетах с помощью коэффициента α_{2A} . Значения критической силы $P_{кр}$ сравнивались с аналитическим решением аналогичной задачи по методу Г.С. Писаренко. [9]. Последнее значение таблицы $P_{кр} = 13.82$ кН соответствует свободному концу А и подсчитано по формуле Эйлера.

Таблица 1 Критические силы (кН)

α_{2A}	$P_{кр}$	$P_{кр}$ (Метод Писаренко)
1.0	113.03	113.06
0.1	112.96	112.99
0.01	112.24	112.27
0.001	98.30	98.32
0.0002	39.98	39.98
0.0001	27.19	27.19
0.0	13.82	13.82

Результаты решения тестовой задачи подтверждают корректность и высокую точность предложенной методики решения, реализованной в виде компьютерной программы удобной для использования. Наложения на свободной конец стержня упругой связи с малой жесткостью значительно повышает его устойчивость при продольном сжатии.

Заключение:

Предложена численно-аналитическая методика позволяющая определить напряженно-деформированное состояние элементов решетки с различными видами заделки, при этом данная методика реализована в своем индивидуальном программном комплексе авторской разработки AutoRSS.05.

Список литературы

1. Бадертдинов И.Р., Кузнецов И.Л., Сабитов Л.С. Напряженно- деформированное состояние трехгранных решетчатых конструкций Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 11. С. 192-194.
2. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2019611305 от 24.01.2019 «AutoRSS.05» Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Бадертдинов И.Р. Заявка 2018662422 от 07.11.2018г.
3. Sabitov L.S., Kuznetsov I.L., Bogdanovich A.U., Khusainov D.M. Critical Load Of Thin-Walled Rod With Various Cross Section Shape By Length Journal of Engineering and Applied Sciences, Volume 11, Number 6 (2016) pp 1186-1190
4. Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Богданович А.У. Напряженно-деформированное состояние слабokonичного стержня переменного сечения //Вестник ИрГТУ г. Иркутск, №7 (90) Июль, 2014г, С. 71-79.
5. Богданович А.У., Кузнецов И.Л. Продольное сжатие тонкостенного стержня переменного сечения при различных вариантах закрепления торцов.//Известия вузов. Строительство, №10, 2005. -С. 19-25.
6. Sabitov L.S., Khamidulin I.N., Kuznetsov I.L., Khusainov D.M. Stress-strained state of supports for energy construction International Journal of Applied Engineering Research (IJAER) Volume 10, Number 24 (2015) pp 45438-45348.
7. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. – М.: Наука, - 1971. – С.186.
8. Под. ред Биргера И.А. и Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания – т.3: Справочное пособие для научных работников. – М.: Машиностроение, - 1968. – С.35.
9. Под. ред. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов: Учеб. пособие для вузов. – Киев: Вища школа – 1979. С.507.

05.13.18

И.Н. Бояршинова канд. техн. наук, М.Р. Бекмансуров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
факультет прикладной математики и механики,
кафедра вычислительной математики, механики и биомеханики,
Пермь, irina.boyarshinova@gmail.com

МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Работа посвящена развитию и совершенствованию двухэтапной методики оптимального проектирования конструкций, изложенной в статьях [1, 2]. На основе данных, полученных в ходе этапа топологической оптимизации, построена конструкция из балок, для которой на втором этапе осуществляется параметрическая оптимизация с целью снижения веса. В данной работе задача параметрической оптимизации решалась при помощи метода Нелдера-Мида, для чего в пакете Ansys Mechanical APDL была написана специальная программа, реализующая алгоритм этого метода. Проведен сравнительный анализ работы встроенного в SolidWorks метода параметрической оптимизации и написанного в Ansys Mechanical ADPL алгоритма Нелдера-Мида. Применение методики с использованием метода Нелдера-Мида дает существенную экономию затрат на проектирование.

Ключевые слова: *оптимальное проектирование, топологическая оптимизация, параметрическая оптимизация, рамная конструкция, метод Нелдера-Мида.*

В настоящее время, когда производители стремятся минимизировать не только производственные затраты, но и затраты на проектирование, большое значение приобретает выбор методов оптимального проектирования конструкций. В рамках развития двухэтапной методики оптимального проектирования конструкций [1, 2] в работе предлагается использовать метод Нелдера-Мида [2, 3] на этапе параметрической оптимизации проектирования рамных конструкций. Метод обладает слабой чувствительностью к размерности задачи, что позволяет увеличивать число параметров оптимизации.

Методика реализована для задачи оптимального проектирования рамной конструкции.

Дана трехмерная конструкция, жестко закрепленная на задней стенке под действием распределенного давления, общий вид которой представлен на рис.1. Требуется создать конструкцию из балок, обладающую минимальным весом, но удовлетворяющую условиям прочности.

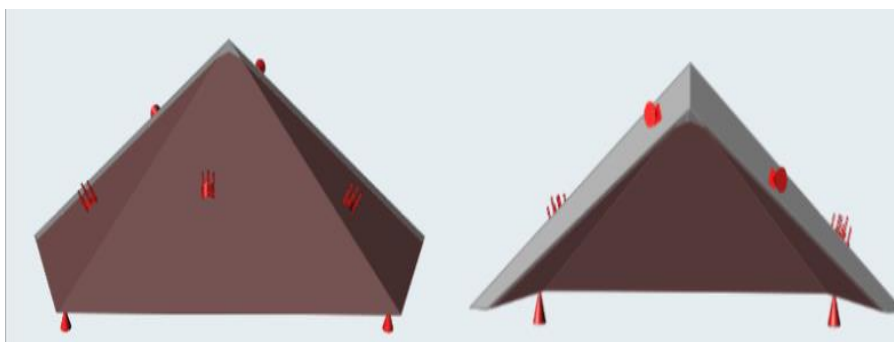


Рис. 1 – Расчетная схема конструкции (вид спереди и сзади)

Решение данной задачи при помощи двухэтапной методики, заключающейся в последовательном использовании топологической [1, 2, 4] и параметрической оптимизации, было приведено в статье [1]. Однако нас не вполне устроил использованный в указанной работе метод параметрической оптимизации, встроенный в пакет SolidWorks, который работает на основе простого перебора всех возможных значений параметров. Применение

этого метода ведет к ограничению числа параметров оптимизации и, кроме того, требует больших затрат времени. Была предложена методика параметрической оптимизации при помощи метода Нелдера-Мида, также известного как метод деформируемого многогранника. Для реализации метода написана оригинальная компьютерная программа в пакете Ansys Mechanical APDL.

Расчетная схема рамной конструкции для параметрической оптимизации, построенная по результатам этапа топологической оптимизации, описанным в статье [1], представлена на рис. 2.

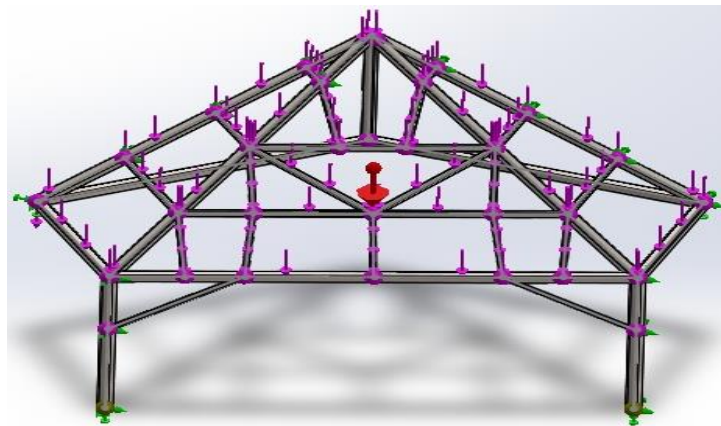


Рис. 2 – Расчетная схема рамной конструкции

Действующее давление перераспределяется по балкам по следующей формуле:

$$P_{\sigma} = \frac{P_{\text{общ}} * S}{\sum_{n=1}^n S_n}, \text{ где} \quad (1)$$

$P_{\text{общ}}$ – общее давление, равное; S – площадь грани исходной модели; S_n – площадь грани балки.

Целевой функцией в задаче параметрической оптимизации выступает вес (объем) конструкции:

$$V(\mathbf{f}, \mathbf{u}, \mathbf{r}_k) \rightarrow \min, k = 1, K, \quad (2)$$

где K – число параметров оптимизации, $\mathbf{f}$ – вектор приложенных сил, $\mathbf{r}_k$ – параметры оптимизации, $\mathbf{u}$ – вектор перемещений. Варьируемые параметры определяют расстояния между поперечными балками. В качестве ограничений заданы максимально допустимые прогибы балок и интенсивность напряжений в конструкции. Напряженно-деформированное состояние конструкции должно удовлетворять уравнениям прямой задачи теории упругости (3) – (6) и граничным условиям (7) – (9). Здесь $w(\mathbf{x})$ – прогиб в направлении оси Oz ; $v(\mathbf{x})$ – прогиб в направлении Oy .

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(EY_y \frac{\partial^2 w^2(\mathbf{x})}{\partial z^2} \right) = p_1(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in V, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(EY_z \frac{\partial^2 v^2(\mathbf{x})}{\partial y^2} \right) = p_2(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in V, \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = E \cdot \boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{x} \in V, \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\xi} = -\xi \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \mathbf{x} \in V, \xi = z, y, \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = 0, \mathbf{x} \in S, \quad (7)$$

$$u(x) = 0, x \in S_u, \quad (8)$$

$$\sigma \cdot n = P, x \in S_f. \quad (9)$$

На рис. 3 представлена конструкция, полученная в результате оптимизации методом Нелдера-Мида в Ansys Mechanical APDL. Интенсивность напряжений и максимальные перемещения не превышают допустимых.

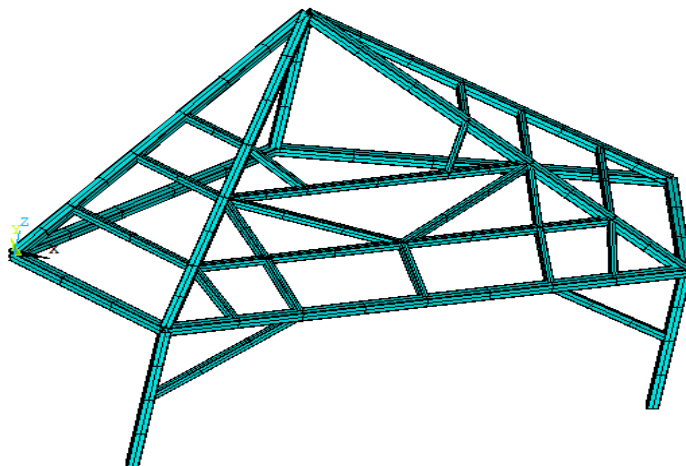


Рис. 3 – Конструкция, оптимизированная методом Нелдера-Мида

Покажем в таблице 1 сравнительную характеристику параметрической оптимизации в Solidworks и Ansys Mechanical APDL с дополнительным написанием метода Нелдера-Мида.

Таблица 1. Сравнение результатов оптимизации двумя методами

Параметры сравнения	Метод Нелдера-Мида в Ansys Mechanical APDL	Метод, встроенный в SolidWorks
Объем затраченной памяти, Гб	1.2	2.1
Время счета, мин	2	160
Количество итераций	26	232
Количество параметров	13	3
Итоговая масса, кг	314.6	387

На основании данных таблицы можно сделать вывод, что метод Нелдера-Мида, самостоятельно написанный в Ansys Mechanical APDL, по всем показателям превосходит метод параметрической оптимизации, встроенный в пакет SolidWorks. При большем количестве параметров оптимизации масса оптимизированной конструкции меньше на 19% при меньших затратах времени счета и объема памяти.

В результате доработки предложенной методики получена существенная экономия компьютерных ресурсов.

Список литературы

1. Бояришнова И.Н., Бекмансуров М.Р. Оптимальное проектирование деталей рамных конструкций // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 11. С. 102-105.
2. Бояришнова И.Н., Ильиных М.С. Двухэтапная методика оптимального проектирования деталей с целью снижения веса // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 11. С. 106-110.
3. Бояришнова И.Н. Применение методов оптимизации к численному анализу температурных полей заготовок кварцевого оптического волокна // Вестник ПНИПУ Механика, 2013. – №1. – С. 39 – 51.
4. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2017, №51.

05.13.18

А.П. Буйнов д-р техн. наук, К.А. Вахрушев

Уральский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург, buinov@mail.ru, VakhrushevKA@ulkm.ru

ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ КОЛЕИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ НА УСЛОВИЯ СВОБОДНОГО ВПИСЫВАНИЯ ТЕЛЕЖЕК ЛОКОМОТИВОВ

В статье приводятся результаты анализа влияния ширины колеи железнодорожного пути на свободное прохождение двухосной тележки локомотива. Показано, что принятая ширина колеи в криволинейных участках железнодорожного пути, радиусом менее 650 м, не соответствует условиям свободного вписывания тележек локомотивов.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, локомотив, тележка, колесная пара, путь, ширина, свобода, вписывание, влияние.

Известно, что для свободного прохождения двухосной тележки в криволинейном участке железнодорожного пути необходимы выполнение двух основных условий: 1) установка движущейся тележки с положением осей колесных пар по радиусам криволинейного участка (радиальная установка); 2) наличие зазора между боковыми гранями головок рельсов и гребнями бандажей колесных пар в направлениях поперек оси пути, достаточного для качения каждой колесной пары по различным кругам катания (с разными радиусами в зависимости от радиуса кривой) по наружному и внутреннему рельсам [1]. Угол между осью тележки и кузова поперек оси пути ($\psi/2$) (см. рисунок) можно определить из соотношения:

$$\sin \frac{\psi}{2} = \frac{L}{2 \cdot R_k}, \quad (1)$$

где L – база локомотива; R_k – радиус кривой.

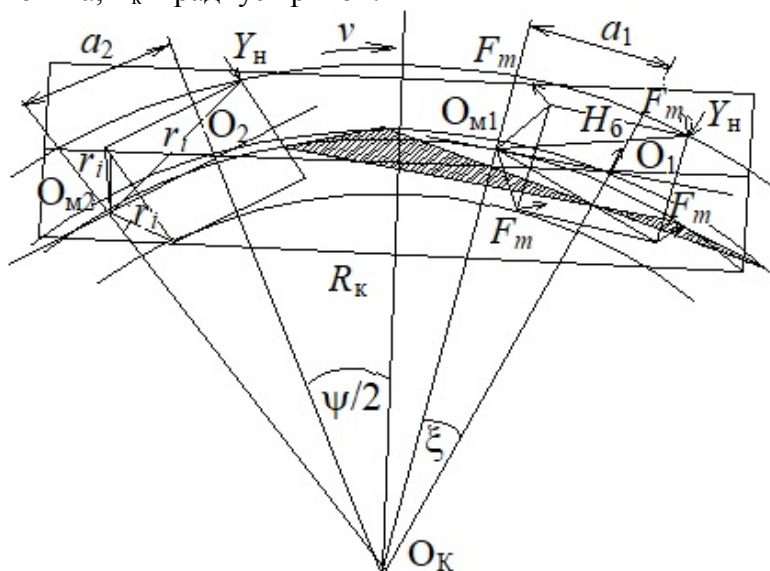


Рис. Схема к расчету вписывания локомотива в кривую: O_1, O_2 – центры подпятниковых узлов тележки ($O_1O_2 = L$); O_{m1}, O_{m2} – полюсы поворота тележек; a_1, a_2 – расстояние от полюса поворота тележек до центра маятниковых опор; r – радиусы-векторы из полюса поворота до центра площадок контакта колес с головкой рельсов и центром подпятника

Движение тележки локомотива в криволинейном участке пути можно представить в виде суммы поступательного движения по направлению продольной оси тележки с линейной скоростью $v = \omega \cdot R_k$ (здесь ω – угловая скорость поворота тележки вокруг центра кривой) и вращательного вокруг мгновенного центра поворота [2]. В случае возвышения наружного рельса в кривых на локомотив действует боковая нагрузка:

$$H_6 = C \cdot \cos \alpha - P_0 \cdot \sin \alpha. \quad (2)$$

Центробежная сила C определяется как:

$$C = M_0 \cdot \frac{v^2}{R_k}, \quad (3)$$

где M_0 – масса локомотива; v – скорость движения.

Сила тяжести локомотива P_0 находится как:

$$P_0 = M_0 \cdot g, \quad (4)$$

где g – ускорение силы тяжести; α – угол, характеризующий возвышение наружного рельса в кривой.

$$\sin \alpha = h / B, \quad (5)$$

где h – возвышение наружного рельса; B – расстояние между кругами катания бандажей колесной пары.

По существующим нормам $h \leq 0,15$ м. Величина B определяется из выражений: при новом рельсе (без бокового износа внутренней грани головки) и бандажа колесной пары после обточки (угол наклона гребня к основанию $\tau = 60^\circ$) $B = S + 2 \cdot r_p + e$, где S – ширина колеи; r_p – радиус выкружки головки рельса; e – средняя ширина площади контакта бандажа на головке рельса; в случае предельного бокового износа рельса и износа гребня ($\tau = 80-90^\circ$) $B = (S + t) + 2 \cdot r_p + e$, где t – предельно-допустимая глубина бокового износа рельса.

По экспериментальным данным в криволинейном участке пути радиусом 400 м среднее значение $e = 22$ мм (наименьшее 10 мм). По существующим нормам для рельсов Р65 и Р75 $t = 15$ мм. По новому стандарту на рельсы $r_p = 15$ мм. Для криволинейного участка пути $S_{\min} = 1516$ мм, $S_{\max} = 1545$ мм. Тогда $B_{\min} = 1568$ мм и $B_{\max} = 1582$ мм. Суммарный зазор между рельсами и гребнями колес составит: $\Delta B_{p\max} = S_{\max} - B_{p\min}$, $\Delta B_{p\min} = S_{\min} - B_{p\max}$, где $B_{p\min}$ – наименьшее расстояние между рабочими гранями гребней бандажей колесной пары, $B_{p\min} = 1437 + 2 \times 34 - 2 \times 8 = 1489$ мм. Здесь 8 мм – наибольший допустимый износ гребня бандажа колесной пары локомотива. Однако одновременный наибольший износ гребней у одной колесной пары не встречается и по статистическим данным $B_{p\min} = 1492$ мм.

При движении локомотива в криволинейном участке пути, если гребень направляющего бандажа колесной пары прижат к боковой грани наружного рельса, то наибольшая возможная ширина площадки контакта второго с головкой рельса составит:

$$e_{p\min} = \Delta B_{k\min} - \Delta B_{p\max} \cdot r_p. \quad (6)$$

По расчету $e_{p\min} = 20$ мм. После подстановки полученных значений B в выражение (5) для $h_{\max} = 0,15$ м, $\sin \alpha = 0,0923$, $\alpha = 5,3^\circ$, $\cos \alpha = 0,996 \approx 1$.

Тогда выражение (2) приводится к виду:

$$H_6 = C - P_0 \cdot \sin \alpha, \quad (7)$$

или, с учетом (3), (5):

$$H_6 = P_0 \cdot \left(\frac{v^2}{g \cdot R_k} - \frac{h}{B} \right). \quad (8)$$

Если в (7) $C \neq P_0 \cdot \sin \alpha$, то появляется непогашенное ускорение центробежной или центростремительной – a_n . Выражение (8) с учетом (4) можно представить в виде:

$$M_0 \cdot a_n = M_0 \cdot g \cdot M_0 = P_0 \cdot \left(\frac{v^2}{g \cdot R_k} - \frac{h}{B} \right),$$

откуда

$$a_n = \frac{v^2}{R_k} - \frac{h}{B} \cdot g, \quad (9)$$

Пределы a_n сравнительно невелики. Так, для $h = 0,15$ м, $v = 1,575$ м, $R_k = 250$ м, по расчету для $u = 1,39$ м/с (5 км/ч) $a_n \cong -0,9$ м/с²; для $u = 27,8$ м/с (100 км/ч) $a_n \cong 2,15$ м/с² (знак минус означает центростремительное ускорение). Первое из перечисленных в начале статьи условий свободного вписывания тележки в кривую связано с положением полюса поворота тележки. Методика определения положения полюса поворота хорошо проработана [3, 4]. Приводятся графики расстояния от полюса поворота до центра подпятникового узла тележки a в виде функции:

$$a = f \cdot \left(\frac{H_6}{4 \cdot F_m} \right), \quad (10)$$

где F_m – сила трения между бандажом колесной пары локомотива и рельсом при скольжении площадки контакта бандажа с головкой рельса во время поворота тележки локомотива вокруг полюса

$$F_m = f \cdot (P_0/2 \cdot n), \quad (11)$$

где f – коэффициент трения между колесом и рельсом; n – количество колесных пар под локомотивом.

По этой же методике в дальнейшем делятся направляющее усилие Y_n в виде функции:

$$Y_n/4 \cdot F_m = f(a), \quad (12)$$

Приведенные данные [4] показывают, что тележки локомотива в большинстве ситуаций движутся в кривой с перекосом, образуя так называемую «шальную» тележку [5]. Угол перекоса тележки определяется из выражения:

$$\sin \xi = a/R_k. \quad (13)$$

Для улучшения вписывания тележки с перекосом необходимо дополнительное уширение колеи к расчетному. Его величина определяется из геометрического построения:

$$2 \cdot \delta = 4 \cdot d \cdot \sin \xi / 2 \cdot \sin \varphi, \quad d = \sqrt{\left(l/2 \right)^2 + \left(b/2 \right)^2} \quad (14)$$

где l – база тележки; v – расстояние между кругами качения бандажей; ξ – угол перекоса тележки; $\varphi = 90^\circ - (\xi + \zeta/2)$, $\operatorname{tg} \zeta = v/l$.

Расчетное уширение колеи для тележки как самостоятельного экипажа составит:

$$a_k = \frac{l}{2 \cdot R_k}, \quad (15)$$

Расчетная ширина колеи определяется из выражения:

$$S_k = E + (2 \cdot t_r) + a_{kc} + \Delta S, \quad (16)$$

где E – наибольшее расстояние между внутренними гранями бандажей; t_r – наибольшая толщина гребня бандажа; ΔS – допуск на сужение колеи. По существующим нормам $\Delta S = 4$ мм, $t_r = 33$ мм.

Второе условие свободного качения колесной пары в кривой (без набегания гребня бандажа на рельс и без проскальзывания) известно в виде:

$$\frac{r_n}{r_b} = \frac{R_k + B/2}{R_k - B/2}, \quad (17)$$

где r_n и r_b – радиусы кругов качения колес колесной пары по наружному и внутреннему рельсам; B – расстояние между кругами катания.

Выполнение условия (17) предполагает так называемый одноточечный контакт колес с рельсом (без упора гребня направляющего колеса в рельс). Однако, как показывают расчеты, в большинстве случаев тележка устанавливается в кривой с перекосом на угол ξ (13), т. е. одноточечный контакт не возможен. При переходе на колею 1520 мм, принятая ширина колеи в криволинейных участках железнодорожного пути, радиусом менее 650 м, не соответствует условиям свободного вписывания тележек локомотивов. Этим условиям удовлетворяют нормы ширины железнодорожной колеи в криволинейных участках пути, использовавшиеся при колее 1524 мм.

Список литературы

1. Буйносов А.П., Марулин С.Л., Яковлев К.Н., Хваловский А.В. Алгоритм построения уравнений вращательной динамики колесной пары подвижного состава в рельсовой колее // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 6. С. 92-94.
2. Буйносов А.П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения : монография. – Уральский гос. ун-т путей сообщ. Екатеринбург, 2009. 224 с.
3. Буйносов А.П., Антропов С.Н. Исследование волнообразного износа рельсов с учетом теории трения пары «колесо–рельс» // Транспорт Урала. 2019. № 1(60). С. 86-89.
4. Буйносов А.П. Алгоритм построения уравнений трансляционной динамики движения колесной пары в рельсовой колее // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 3. С. 87-90.
5. Буйносов А.П., Фетисова Н.Г. Основные принципы создания компьютерной модели экипажной электровоза // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 2. С. 54-56.

05.13.18

Г.М. Гузаиров канд. физ.-мат. наук, Н.А. Мунасыпов канд. физ.-мат. наук

Оренбургский государственный педагогический университет,
кафедра математики и методики преподавания математики
Оренбург, gafur.mustafin@mail.ru, nail.munasyrov@mail.ru

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ НА ГРУППЕ ЛОРЕНЦА И КОМПЛЕКСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОНТОРОВИЧА-ЛЕБЕДЕВА

Представления группы Лоренца можно реализовать интегральными операторами с помощью разложения функций на C в комплексный интеграл Фурье. Ядра этих интегральных операторов выражаются через гипергеометрические функции Бесселя. Здесь получена новая пара взаимно обратных интегральных преобразований функций на C с этими ядрами.

Ключевые слова: *представления группы Лоренца, преобразования Фурье на группе, гипергеометрические функции Бесселя, преобразования Конторовича-Лебедева.*

Под S будем понимать группу Лоренца в следующей ее реализации:

$$S = SL(2, C) = \left\{ g = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \mid a, b, c, d \in C, \det g = 1 \right\}. \quad (S)$$

Представления группы S задают операторы

$$T[L; g] \circ f(z) = |bz + d|^{-2-2\lambda+2l} (bz + d)^{-2l} f\left(\frac{az + c}{bz + d}\right), \quad (T)$$

действующие в подходящим образом выбранных пространствах Ω_L функций $f(z)$ на C (параметры L, λ, l где $L = (\lambda, l)$, $\lambda \in C$, $2l \in \mathbb{Z}$, называют параметрами веса представления). Эти представления группы Лоренца были описаны в работе [1]. Там же была вычислена мера Планшереля преобразований Фурье на группе Лоренца.

Для “матричной записи” представлений (T) мы применим разложения функций из Ω_L в комплексный интеграл Фурье. Интегральный метод в приложениях к теории представлений групп также хорошо известен; широко применялся, например, в работе [2] к различным матричным группам, в том числе, к вещественному аналогу группы $SL(2, C)$ – группе $SL(2, R)$. Аналогичные построения для группы Лоренца были выполнены в работе [3].

Интегральные операторы представлений возникают при переходе от функций из пространства Ω_L к их комплексным преобразованиям Фурье, для краткого описания которых введем обозначения для унимодулярных характеров аддитивной группы комплексных чисел $C_0 = \langle C, + \rangle$:

$$\chi_0[A; z] = \exp(-2i \operatorname{Re}(Az)), \text{ где } A \in C. \quad (0)$$

Обозначим также

$$f_0[A] = \frac{1}{\pi} \int_C d(\operatorname{Re} z) d(\operatorname{Im} z) \cdot \chi_0[-A; z] \cdot f(z) = \frac{1}{\pi} \int_C d[z] \cdot \chi_0[-A; z] \cdot f(z), \quad (1)$$

где $d[z] = d(\operatorname{Re} z) d(\operatorname{Im} z)$ – мера Хаара на группе C_0 – положительно определенная и инвариантная относительно аддитивных сдвигов $z \rightarrow z + a$. Для функций с интегрируемым модулем и квадратом модуля имеют место: формула обращения

$$f(z) = \frac{1}{\pi} \int_C d[A] \cdot \chi_0[A; z] \cdot f_0[A], \quad (2)$$

равенство Парсеваля

$$\int_C d[A] \cdot f_0[A] \cdot h_0[-A] = \int_C d[z] \cdot f(z) \cdot h(z), \quad (3)$$

формула Планшереля

$$\int_C d[A] \cdot |f_0[A]|^2 = \int_C d[z] \cdot |f(z)|^2. \quad (4)$$

Преобразованиями (1)-(2) сводятся к разложению $f(z)$ в двойной интеграл Фурье по параметрам $\operatorname{Re} z$ и $\operatorname{Im} z$. Следующие интегралы:

$$\begin{aligned} \chi_n[A, B; L; g] &= \left| \frac{B}{A} \right|^{\lambda-l-n} \cdot \left(\frac{B}{A} \right)^{l+n} \cdot \frac{1}{\pi} \int_C d[z] \cdot \chi_0[-A; z] \cdot T[L; g] \circ \chi_0[B; z] = \\ &= |A|^{\lambda-l+n} A^{l-n} \cdot |B|^{\lambda-l-n} B^{l+n} \exp\left(-2i \operatorname{Re} \frac{Ad + Ba}{b}\right) \cdot |b|^{-2-2\lambda+2l} (b)^{-2l} \times \\ &\quad \times i^{2l} \frac{\Gamma(-\lambda+l)}{\Gamma(1+\lambda+l)} \cdot {}_0F_1\left(1+\lambda+l; -\frac{AB}{b^2}\right) \cdot {}_0F_1\left(1+\lambda-l; -\frac{\overline{AB}}{b^2}\right) + \\ &+ |A|^{-\lambda+l+n} A^{-l-n} |B|^{-\lambda+l-n} B^{-l+n} \cdot \exp\left(-2i \operatorname{Re} \frac{Ad + Ba}{b}\right) \cdot |b|^{-2+2\lambda-2l} (b)^{2l} \times \\ &\quad \times i^{-2l} \frac{\Gamma(\lambda-l)}{\Gamma(1-\lambda-l)} \cdot {}_0F_1\left(1-\lambda-l; -\frac{AB}{b^2}\right) \cdot {}_0F_1\left(1-\lambda+l; -\frac{\overline{AB}}{b^2}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

$n \pm l \in \mathbb{Z}$, $\lambda \pm l \notin \mathbb{Z}$, $-1 < \operatorname{Re} \lambda < 1$, являются аналогами матричных элементов операторов представлений T , точнее, ядрами интегральных операторов представлений в “базисе” (0). Гипергеометрические ряды ${}_0F_1$ могут быть выражены через функции Бесселя или различные их модификации.

Отметим для ядер (5) соотношения симметрии:

$$\chi_n[B, A; L; g^{-1}] = \chi_{-n}[-A, -B; -L; g], \quad (6)$$

которые получаются из интегральных представлений ядер с помощью замены переменной или из явных выражений ядер. Следующее равенство

$$\chi_n[A, B; L; g] = \chi_n[A, B; -L; g], \quad (7)$$

выражающее факт эквивалентности представлений с противоположными параметрами веса, получается из явных выражений ядер – для достижения этой симметрии и были перед интегралом (5) взяты сомножители, содержащие “строчно-столбцовые” параметры A и B ядер. Соотношение

$$\chi_n[B, A; L; g^{-1}] = \overline{\chi_n[A, B; L; g]} \text{ при } \lambda \in i\mathbb{R}, \quad (8)$$

выражает факт унитарности представлений T при чисто мнимых λ . Наконец, имеют место соотношения однородности:

$$\chi_n[A, B; L; k_0(u) \cdot g \cdot k_0(v)] = \chi_0[A; u] \cdot \chi_n[A, B; L; g] \cdot \chi_0[B; v], \quad (9)$$

где k_0 – нижняя треугольная матрица с единицами на диагонали:

$$k_0(w) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ w & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Для ядер (5) имеют место формулы обращения вида (2):

$$\frac{1}{\pi} \int_C d[A] \cdot \left| \frac{A}{B} \right|^{\lambda-l-n} \cdot \left(\frac{A}{B} \right)^{l+n} \cdot \chi_0[A; z] \cdot \chi_n[A, B; L; g] = T[L; g] \circ \chi_0[B; z], \quad (11)$$

сопряженные формулы обращения, эквивалентные (11) с помощью (6):

$$\frac{1}{\pi} \int_C d[B] \cdot \left| \frac{A}{B} \right|^{\lambda-l-n} \cdot \left(\frac{A}{B} \right)^{l+n} \cdot \chi_0[-B; z] \cdot \chi_n[A, B; L; g] = T[-L; g^{-1}] \circ \chi_0[-B; z], \quad (12)$$

и теоремы сложения:

$$\frac{1}{\pi} \int_C d[C] \cdot \chi_n[A, C; L; g_1] \cdot \chi_n[C, B; L; g_2] = \chi_n[A, B; L; g_1 g_2]. \quad (13)$$

Ядра (5) были вычислены в [3]; в [4] были приведены в развернутом виде соотношения (11), (12), (13) для ядер и их уточнения для слагаемых, составляющих ядра; в [5] были получены взаимно-обратные интегральные преобразования функций на S с ядрами (5) типа интегральных операторов представлений группы – комплексные аналоги преобразований Ханкеля. Здесь будут получены новые взаимно-обратные преобразования с ядрами (5) – комплексные аналоги интегральных преобразований Конторовича-Лебедева, связанные с преобразованиями Фурье на группе S .

Преобразование Фурье функции $f(g)$ на S – это операторная функция

$$F[L] = \int_S D(g) \cdot T[L; g^{-1}] \cdot f(g), \quad (14)$$

где $D(g)$ – инвариантная мера на группе S :

$$D(g) = |a|^{-2} d[a] d[b] d[c], \quad (15)$$

и, по-прежнему, $d[z] = d(\operatorname{Re} z) d(\operatorname{Im} z)$. Для $f(g)$ с интегрируемым по мере (15) модулем и квадратом модуля имеет место формула обращения:

$$f(g) = \sum_{l \in \mathbb{Z}-n} \frac{1}{2i \cdot \pi^4} \int_0^{+i\infty} d\lambda \cdot (l^2 - \lambda^2) \cdot \operatorname{tr}\{F[L]T[L; g]\}, \quad (16)$$

см. [6, с.218], где tr – след оператора, $L = (\lambda, l)$.

След представления не зависит от его конкретной реализации, поэтому в (14)-(16) можно использовать интегральные операторы представлений с ядрами (5).

Введем на S новые параметры, соответствующие разложению

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ u & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & z \\ -\frac{1}{z} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ v & 1 \end{pmatrix}.$$

Найдем: $a = zv$, $b = z$, $c = zuv - \frac{1}{z}$, $d = zu$ и $z = b$, $u = \frac{d}{b}$, $v = \frac{a}{b}$, т.е. разложение осуществимо почти всюду на группе (при $b \neq 0$).

Мера (15) в новых параметрах примет вид:

$$D(g) = |a|^{-2} d[a] d[b] d[c] = |z|^2 d[u] d[z] d[v]. \quad (17)$$

Для функции $f(g)$, зависящей от параметров u , z , v следующим образом:

$$f(g) = \exp(-2i \operatorname{Re} Au) \cdot \varphi(z) \cdot |z|^{-2} \cdot \exp(-2i \operatorname{Re} Av) \quad (18)$$

разложение (16) примет вид следующего разложения для $\varphi(z)$:

$$\begin{aligned} \varphi(z) = \sum_{l \in \mathbb{Z}-n} \frac{(-1)^{2l} + i\infty}{2 \cdot i} \int_0^{+i\infty} d\lambda \cdot (l^2 - \lambda^2) \cdot \Phi_A[L] \times \\ \times \left\{ \left| \frac{A}{z} \right|^{+2\lambda-2l} \left(\frac{A}{iz} \right)^{+2l} \cdot \frac{\Gamma(-\lambda+l)}{\Gamma(1+\lambda+l)} \cdot {}_0F_1\left(1+\lambda+l; -\frac{A^2}{z^2}\right) {}_0F_1\left(1+\lambda-l; -\frac{\bar{A}^2}{z^2}\right) + \right. \\ \left. + \left| \frac{A}{z} \right|^{-2\lambda+2l} \left(\frac{A}{iz} \right)^{-2l} \cdot \frac{\Gamma(+\lambda-l)}{\Gamma(1-\lambda-l)} \cdot {}_0F_1\left(1-\lambda-l; -\frac{A^2}{z^2}\right) {}_0F_1\left(1-\lambda+l; -\frac{\bar{A}^2}{z^2}\right) \right\}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\Phi_A[L] = \int_C \frac{d[z]}{|z|^2} \cdot \varphi(z) \times \quad (20)$$

$$\times \left\{ \left| \frac{A}{z} \right|^{+2\lambda-2l} \left(\frac{A}{iz} \right)^{+2l} \cdot \frac{\Gamma(-\lambda+l)}{\Gamma(1+\lambda+l)} {}_0F_1 \left(1+\lambda+l; -\frac{A^2}{z^2} \right) {}_0F_1 \left(1+\lambda-l; -\frac{\overline{A}^2}{z^2} \right) + \right. \\ \left. + \left| \frac{A}{z} \right|^{-2\lambda+2l} \left(\frac{A}{iz} \right)^{-2l} \cdot \frac{\Gamma(+\lambda-l)}{\Gamma(1-\lambda-l)} {}_0F_1 \left(1-\lambda-l; -\frac{A^2}{z^2} \right) {}_0F_1 \left(1-\lambda+l; -\frac{\overline{A}^2}{z^2} \right) \right\}.$$

Пара (19)-(20) снабжается равенством Парсеваля:

$$\int_C \frac{d[z]}{|z|^2} \cdot \varphi(z) \cdot \phi(-z) = \sum_{l \in \mathbb{Z}-n} \frac{1}{2i} \int_0^{+\infty} d\lambda (l^2 - \lambda^2) \cdot \Phi_A[L] \cdot \Psi_A[L], \quad (21)$$

и соответствующей формулой Планшереля.

Список литературы

1. Гельфанд, И.М. Унитарные представления группы Лоренца / И.М. Гельфанд, М.А. Наймарк // Известия АН СССР. – 1947. – сер.матем.11 (5). – с. 411-504.
2. Виленкин Н.Я. Специальные функции и теория представления групп / Н.Я. Виленкин. – М.: Наука, 1965. – 588 с.
3. Гузаиров Г.М. Матричные элементы представлений группы $SL(2, \mathbb{C})$ в смешанных базисах и некоторые соотношения для гипергеометрических функций ${}_0F_1, {}_1F_1, {}_2F_1$ // Депонировано в ВИНТИ 14.04.92, N 1274-B92.
4. Гузаиров Г.М. Представления группы Лоренца и соотношения для функций Бесселя / WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS: сборник статей III международной научно-практической конференции. Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2016. – С. 19-25.
5. Гузаиров Г.М. Представления группы Лоренца и разложения функций на $\mathbb{C}$ по функциям Бесселя / Научно-технический вестник Поволжья №4, 2019. – Казань: ООО «Научно-технический вестник Поволжья», 2019. – С.11-14.
6. Желобенко Д.П., Штерн А.И. Представления групп Ли / Д.П. Желобенко, А.И. Штерн. – М.: Наука, 1983. – 360 с.

05.13.18

А.О. Казакова канд. физ.-мат.наук

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
факультет прикладной математики, физики и информационных технологий,
кафедра актуарной и финансовой математики,
Чебоксары, kazakova_anastasia@bk.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОДНОРОДНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ТЕЛЕ МНОГОСВЯЗНОГО СЕЧЕНИЯ

Рассматривается плоская задача о стационарном распределении температуры в однородном цилиндрическом теле произвольного многосвязного сечения. Задача описывается уравнением Лапласа для температуры в многосвязной плоской области. Для решения задачи предложено использование модификации метода граничных элементов, обладающей экспоненциальной сходимостью. Рассмотрены примеры для областей, ограниченных круглыми, эллиптическими и прямоугольными контурами. На тестовом примере показана эффективность алгоритма.

Ключевые слова: *стационарное распределение температуры, многосвязная область, уравнение Лапласа, метод граничных элементов.*

Задача о стационарном распределении температуры в однородной среде описывается уравнением Лапласа [1]. На границе области может быть задана температура (задача Дирихле), либо тепловой поток (задача Неймана). В данной работе рассматривается первая постановка. Для численного решения такой задачи часто применяются разностные схемы на двумерной сетке [2]. Такие схемы не превышают второго порядка точности для прямоугольных областей. Для областей, ограниченных криволинейными границами, используются методы конечных элементов [3]. В этом случае требуется сильно сгущать сетку в окрестности особых точек границы. В последнее время стали применяться методы граничных элементов, в которых на границе области задается одномерная сетка. Число элементов сетки значительно сокращается, порядок точности может быть значительно увеличен, а сгущать одномерную сетку в окрестности особых точек границы существенно проще. Наиболее часто используются линейные граничные элементы, такая схема имеет второй порядок точности [4]. В настоящей работе используется схема без насыщения метода граничных элементов [5]. В такой схеме с увеличением числа элементов сетки в арифметической прогрессии ошибка уменьшается в геометрической прогрессии, наблюдается экспоненциальная сходимость.

Постановка задачи

Пусть цилиндрическое однородное тело имеет сечение, представляющее собой плоскую многосвязную область D с граничными контурами C_0 (внешний контур) и C_k , $k = \overline{1, m}$ (внутренние контуры). На каждом контуре задана своя постоянная температура T_k ($k = \overline{0, m}$). Необходимо определить температуру в каждой точке внутри области. Как известно, уравнение теплопроводности для теплоизолированной системы имеет вид

$$T'_i = a^2 \Delta T, \quad (1)$$

где T – температура, a – коэффициент, Δ – оператор Лапласа.

Если процесс установившийся, то $T'_i = 0$, и задача описывается уравнением Лапласа для температуры в многосвязной плоской области с заданными температурами на каждом контуре (задача Дирихле):

$$\Delta T(x, y) = 0, \quad (x, y) \in D; \quad T|_{C_k} = T_k, \quad k = \overline{0, m}. \quad (2)$$

Интегральное соотношение для гармонической функции

На контуре ∂D удобно ввести дуговую координату s . Для гармонической в плоской области D функции T имеет место соотношение:

$$AT_n(s) + BT(s) = 0, \quad (s \in \partial D), \quad (3)$$

где T_n – нормальная производная функции T , A и B – линейные операторы:

$$AT_n(s) = - \int_{\partial D} G(s, s') T_n(s') ds', \quad BT(s) = \int_{\partial D} G_n(s, s') (T(s') - T(s)) ds',$$

$$G(s, s') = \ln(r(s, s')), \quad r(s, s') = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}.$$

Интегральное соотношение для гармонической функции в таком виде, где подынтегральная функция оператора B не имеет особенностей, насколько нам известно, впервые было использовано в [5]. В каждой внутренней точке M области D функция $T(M)$ представляется в виде

$$2\pi T(M) = \int_{\partial D} \left[-G(M, M') \frac{\partial T}{\partial n'}(M') + T(M') \frac{\partial G(M, M')}{\partial n'} \right] \partial s', \quad M \in D. \quad (4)$$

Численный алгоритм

Для проведения численных расчетов вводится дискретизация контуров конечным числом точек: точке $M_i^{(k)}$ ($i = \overline{1, N_k}$, $k = \overline{0, m}$) соответствует значение $\zeta_i^{(k)} = i / N_k$. Если точки на каждом контуре распределены равномерно, то с помощью квадратурных формул без насыщения [6] интегральное уравнение (3) аппроксимируется системой линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{j=1}^N (A_{ij} T_j^n + B_{ij} T_j) = 0, \quad i = \overline{1, N}, \quad (N = N_0 + N_1 + \dots + N_m), \quad (6)$$

$$A_{ij} = -\frac{lf_j}{N} (\beta(|i-j|) + G_{ij}), \quad \beta(n) = -\ln \left| \sin \frac{\pi n}{N} \right| + \alpha(n), \quad n \neq 0, \quad \beta(0) = \alpha(0),$$

$$\alpha(n) = -\left(\ln 2 + \frac{(-1)^n}{N} \sum_{q=1}^{\frac{N-1}{2}} \frac{1}{q} \cos \frac{2\pi qn}{N} \right), \quad T_j^n = T_n(\zeta_j), \quad G_{ij} = G(\zeta_i, \zeta_j) \quad i \neq j, \quad G_{ii} = \ln \frac{lf_i}{\pi},$$

$$BT(\zeta_i) = \sum_{j=1}^N B_{ij} T_j, \quad B_{ij} = \frac{1}{N} G_{ij}^n, \quad i \neq j, \quad B_{ii} = -\sum_{j=1}^N B_{ij}, \quad T_j = T(\zeta_j), \quad G_{ij}^n = G_n(\zeta_i, \zeta_j).$$

В системе (6) значения T_j известны и задаются граничными условиями постановки (2).

Решив систему (6) относительно неизвестных значений T_j^n , можно определить приближенное значение искомой гармонической функции T в любой внутренней точке $(x, y) \in D$, используя формулу (4):

$$T(x, y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^m \sum_{j=1}^{N_k} \left(-\frac{l_k f_j^k}{N_k} G_j(x, y) T_j^n + \frac{1}{N_k} G_j^n(x, y) T_j \right).$$

Тестовый пример

Рассмотрим цилиндрическое тело с сечением в виде концентрического кольца с внешним радиусом ρ_0 и внутренним радиусом ρ_1 . Каждый контур имеет свою заданную постоянную температуру T_k ($k = \overline{0, 1}$). Задача состоит в определении температуры в каждой точке кольца и может быть решена аналитически в полярных координатах (ρ, θ) . Гармоническая функция T не зависит от полярного угла θ и имеет вид [1]:

$$T(\rho) = a + b \ln \rho, \quad a = \frac{T_1 \ln \rho_0 - T_0 \ln \rho_1}{\ln(\rho_0 / \rho_1)}, \quad b = \frac{T_0 - T_1}{\ln(\rho_0 / \rho_1)}. \quad (7)$$

Задача была решена численно для значений $\rho_0 = 2$, $\rho_1 = 1$, $T_0 = 3$, $T_1 = 4$ и получено приближенное значение температуры $\tilde{T}_N(\rho)$. В таблице 1 представлена величина погрешности $\delta(\rho) = |T(\rho) - \tilde{T}_N(\rho)|$ для некоторых фиксированных значений полярного радиуса ρ и различных N_1 ($N_0 = 2N_1$). Видно, что с увеличением числа граничных элементов по арифметической прогрессии ошибка убывает по геометрической прогрессии, наблюдается экспоненциальная сходимость используемой численной схемы.

Таблица 1 – значения погрешности $\delta(\rho)$

N_1	$\rho = 1.2$	$\rho = 1.4$	$\rho = 1.6$	$\rho = 1.8$
32	$1.19 \cdot 10^{-2}$	$8.53 \cdot 10^{-5}$	$3.06 \cdot 10^{-6}$	$3.51 \cdot 10^{-3}$
48	$6.38 \cdot 10^{-4}$	$3.90 \cdot 10^{-7}$	$2.13 \cdot 10^{-9}$	$1.21 \cdot 10^{-4}$
64	$3.44 \cdot 10^{-5}$	$1.79 \cdot 10^{-9}$	$1.53 \cdot 10^{-13}$	$4.15 \cdot 10^{-6}$
80	$1.86 \cdot 10^{-6}$	$8.25 \cdot 10^{-12}$	$1.21 \cdot 10^{-14}$	$1.43 \cdot 10^{-7}$
96	$1.01 \cdot 10^{-7}$	$3.26 \cdot 10^{-14}$	$1.25 \cdot 10^{-15}$	$4.90 \cdot 10^{-9}$

Результаты численных расчетов

1. Пусть область D ограничена двумя эллипсами с полуосями a_0, b_0 (внешний контур) и a_1, b_1 (внутренний контур) с центрами в начале координат, каждый из которых имеет некоторую постоянную температуру T_k ($k = \overline{0,1}$). Задача была решена численно для значений $a_0 = 2$, $b_0 = 1.5$, $a_1 = 0.5$, $b_1 = 0.75$, $T_0 = 2$, $T_1 = 1$ ($N_1 = 40$, $N_0 = 80$). На рис. 1 представлены полученные изотермы и значения температуры на них.

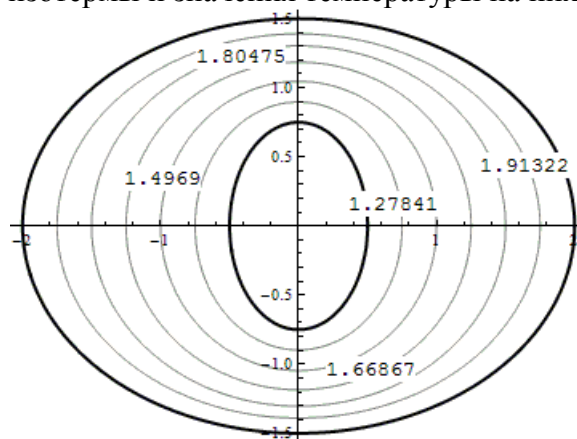


Рис. 1 – Изотермы в двусвязной области

2. Рассмотрим теперь трехсвязную область D с границами C_0 (внешний контур – прямоугольник со сторонами $2a_0, 2b_0$ с центром в начале координат) и C_1, C_2 (внутренние контуры – окружности радиусов ρ_1 и ρ_2 соответственно, центры которых лежат на оси Ox). Для численного решения задачи углы прямоугольника сглаживаются. На каждом контуре задана некоторая постоянная температура T_k ($k = \overline{0,2}$). Задача была решена численно для значений $a_0 = 0.6$, $b_0 = 1$, $\rho_1 = \rho_2 = 0.15$, $dx_1 = -dx_2 = -0.5$, $T_0 = 0$, $T_1 = 3$, $T_2 = 5$ ($N_1 = N_2 = 48$, $N_0 = 120$). На рис. 2 изображены соответствующая трехсвязная область и полученные изотермы.

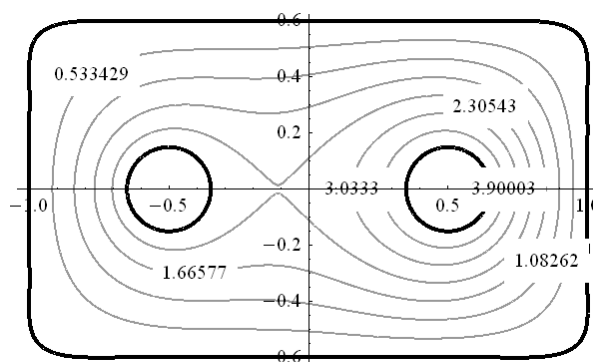


Рис. 2 – Изотермы в трехсвязной области

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-31-00220).

Список литературы

1. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of heat in solids. Oxford, Clarendon Press, 1984.
2. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – Москва: Наука, 1978.
3. Reddy J.N. An introduction to the finite element method. McGraw-Hill, 2006.
4. Казакова А.О. О сходимости численного метода линейных граничных элементов для решения полигармонического уравнения // Вестник Чувашиского университета. 2018. № 3. С. 206 – 216.
5. Воинов В.В., Воинов О.В., Петров А.Г. Метод расчета потенциального обтекания тела вращения потоком несжимаемой жидкости // ЖВМиМФ. 1974. Т. 14. № 3. С. 797–802.
6. Петров А.Г. Квадратурные формулы для периодических функций и их приложение к методу граничных элементов // ЖВМиМФ. 2008. Т. 48. № 8. С. 1344–1361.

05.13.18

Т.К. Ксенофонтова канд. техн. наук

ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К. А. Тимирязева,
Институт мелиорации водного хозяйства и строительства,
кафедра инженерных конструкций,
Москва, tksenofontova@rgau-msha.ru

РАСЧЕТ ПОДЗЕМНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБ С УЧЕТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПО МЕТОДУ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ (МФА)

В статье приведен алгоритм расчета подземных железобетонных труб на основе использования метода функциональной аппроксимации расчетных параметров (МФА), позволяющий с помощью программных комплексов учитывать в расчете реактивное сопротивление грунта при изменении его характеристик по кольцу трубы (цилиндрическая анизотропия грунтового основания).

Ключевые слова: подземные железобетонные трубы, реактивный отпор грунта, метод конечных элементов, цилиндрическая анизотропия грунтового основания.

При расчете подземных железобетонных труб считается, что они являются жесткими конструкциями, их деформации малы и, следовательно, влияние отпора грунта на работу труб невелико. Однако, как показывают расчеты [1, с. 61], [2, с. 82], при средних и больших диаметрах железобетонных труб гибкость их увеличивается, поэтому в трубах отпор грунта может оказать существенное влияние.

При расчете подземных трубопроводов, как и других инженерных сооружений широко используется метод конечных элементов. Наряду с этим для расчета могут быть использованы и другие методы, как, например, предложенный автором метод функциональной аппроксимации расчетных параметров (МФА) [3, с. 31...48]. Метод основан на замене континуальных условий контакта инженерного сооружения с грунтом дискретным контактом, а изменение параметров по контуру труб, а именно: геометрических и механических характеристик, нагрузок, граничных условий, деформаций сооружения и внутренних усилий в нем, других параметров характеризуется подобранными функциями, значения которых совпадают со значениями в местах дискретного контакта (рис.1).

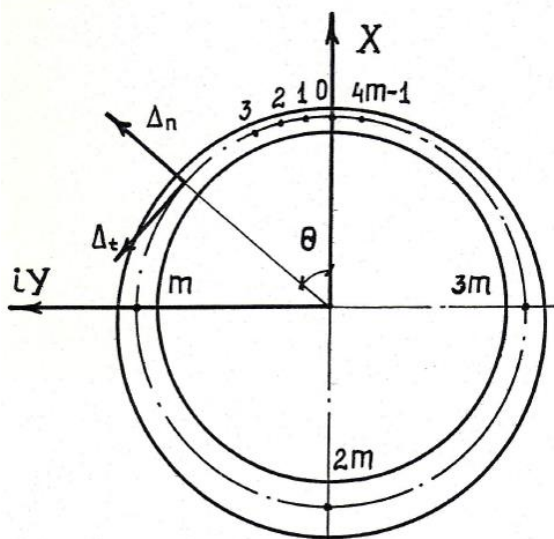


Рис. 1 – Расчетная схема трубы по МФА

При исследовании работы подземной трубы с учетом реактивного отпора грунта учитывались следующие нагрузки: давление грунта и грунтовой воды, собственный вес трубы, внутреннее гидростатическое и напорное давление воды. Перечисленные нагрузки являются заданными в соответствии с существующими нормами. Под действием этих нагрузок происходит перемещение трубы в грунте как абсолютно жесткого тела на величину $\Delta_{0(nt)}$, в результате чего возникает отпор грунта $r_{0(nt)}$, а также происходит деформация трубы, в результате которой со стороны грунта возникает реактивный отпор r , который может быть разложен на две составляющие r_n и r_t , которые определяются по формулам:

$$r_n = -k_n \Delta_n; \quad r_t = -k_t \Delta_t, \quad (1)$$

где Δ_n и Δ_t – нормальная и тангенциальная составляющие перемещений; k_n и k_t – коэффициенты сопротивления грунта для реактивного давления, направленного по нормали и по касательной к наружной поверхности трубы.

Величина касательных составляющих реактивного давления грунта меньше, чем составляющих, направленных по нормали. Поэтому можно принять $k_t = \mu k_n$, где μ – коэффициент, который определяется по условию: $0 \leq \mu \leq \operatorname{tg} \varphi_0$, где φ_0 – угол внешнего трения грунта.

Коэффициенты постели грунтового основания в общем случае изменяются по кольцу трубы, т. е. имеет место цилиндрическая анизотропия грунта. Учет этого можно представить по приведенной ниже зависимости изменения коэффициентов постели

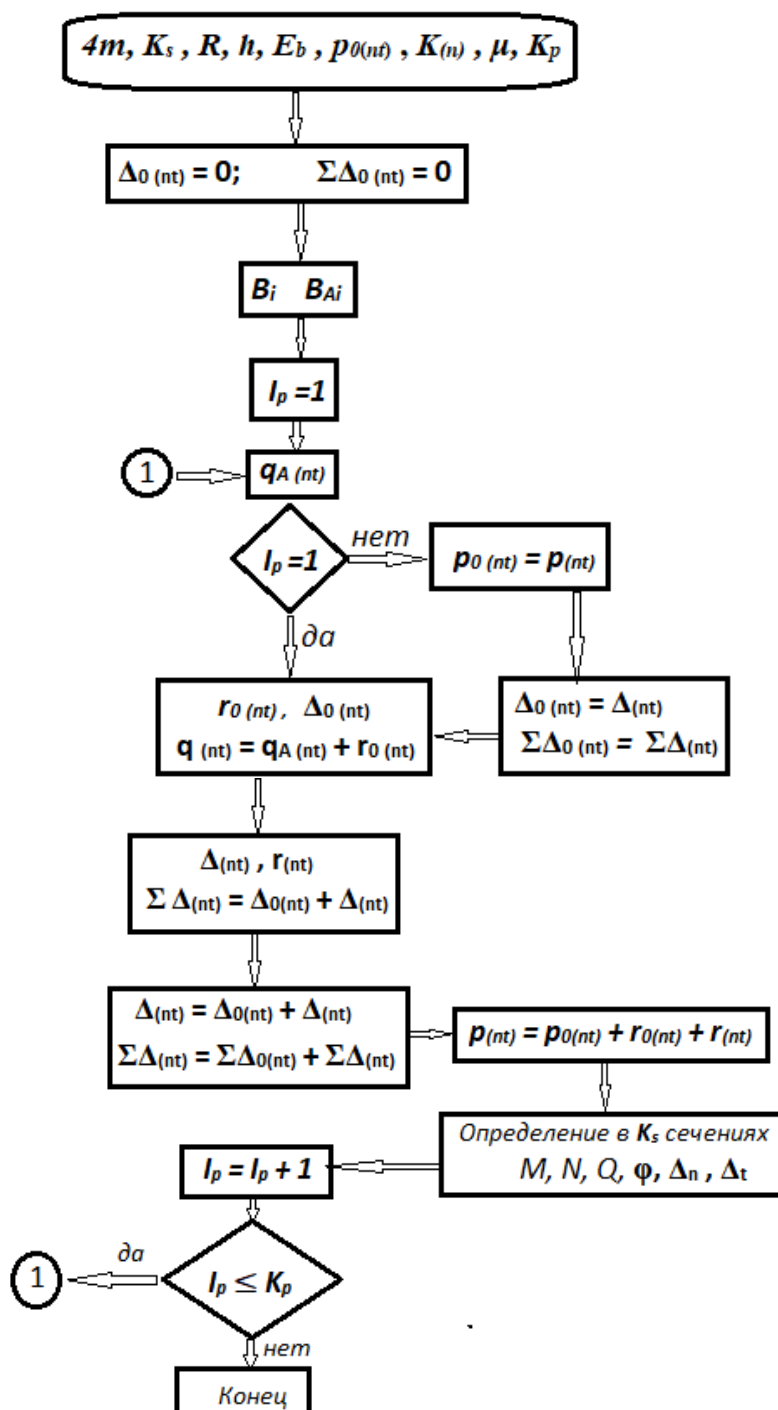
$$k_n = k_{(n)} A^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ \cos \theta \\ \dots \\ \cos 2m\theta \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $k_{(n)} = (k_{n0} k_{n1} \dots k_{n,2m})$ – строка частных значений нормальных коэффициентов сопротивления грунта в точках трубы, определяемых углами θ_i ; A – числовая матрица.

Последовательность расчета труб представлена ниже в блок-схеме. Исходными данными в расчете являются: $4m$ – количество узлов аппроксимации по кольцу трубы (рис.1); k_s – количество расчетных сечений, в которых определяются внутренние усилия и перемещения, а также характеристики трубы: h – толщина стенки в расчетном сечении, E_b – начальный модуль упругости железобетона; k_p – расчетное количество нагрузок и их параметры. Для грунта вводятся в каждом узле аппроксимации коэффициенты реактивного сопротивления k_i , которые характеризуются матрицей $k_{(n)}$, коэффициент μ и $p_{0(nt)}$ – величины нормальных и тангенциальных составляющих начального давления грунта.

Перед выполнением расчетов обнуляем начальные значения перемещений, связанных с деформацией оси стенки трубы $\Delta_{0(nt)} = 0$ и полных перемещений $\Sigma \Delta_{0(nt)} = 0$. Вычисляются изгибные жесткости сечений B_i и жесткости сечений при работе на продольную силу B_{Ai} . Затем открывается цикл по нагрузке. Первой нагрузкой на трубу, соответствующей счетчику $I_p = 1$, является начальное давление грунта и собственный вес трубы. Для этой нагрузки определяются значения $\Delta_{(nt)}$ и находятся необходимые расчетные величины: параметры давления грунта на трубу $p_{(nt)}$, значения полных перемещений $\Sigma \Delta_{(nt)}$, углов поворота сечений φ , а также внутренние усилия – изгибающие моменты M , продольные силы N , поперечные силы Q . При действии на трубу нескольких нагрузок, таких как гидростатическое и внутреннее давление воды, воздействие транспортных средств на поверхности засыпки и другие, полученные значения $p_{(nt)}$, $\Delta_{(nt)}$, $\Sigma \Delta_{(nt)}$ в качестве начальных значений для следующей нагрузки, затем расчетные операции повторяются вновь.

Блок-схема расчета подземных железобетонных труб по методу функциональной аппроксимации расчетных параметров (мфа) с учетом цилиндрической анизотропии грунтового основания



Список литературы

1. Виноградов С.В. Влияние упругого отпора грунта на прочность подземной железобетонной трубы. – Труды / МГМИ. – М., 1979, т. 64, с. 59 – 65.
2. Ксенофонтова Т.К. Методика учета влияния реактивного отпора грунта при расчете подземных железобетонных труб. – Научно-технический вестник Поволжья, № 4, 2016, – с. 80 – 82.
3. Ксенофонтова Т.К. Расчет подземных железобетонных трубопроводов при переменных параметрах труб и грунта. – Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук / М.: МГМИ, 1987, 230 с.

05.13.18

А.С. Титовцев канд. техн. наук

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Кафедра интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами,
Казань, notna6683@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА В СИСТЕМАХ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ ПОТОКОВ

В статье представлены результаты исследования нестационарного режима в открытой многоканальной системе массового обслуживания, имеющей m обслуживающих устройств одинаковой производительности с экспоненциально распределенным временем обслуживания. Входной поток, носящий пуассоновский характер, включает в себя заявки разных типов, поступающих из произвольного количества источников h и имеющих различные ограничения по длине очереди. Изучено поведение характеристик системы в нестационарном режиме.

Ключевые слова: очередь, качество обслуживания, система массового обслуживания, $M/M/m/K$, обслуживающее устройство.

1. Введение

В работах автора [1,2], развивающих идеи [3,4] была представлена универсальная математическая модель открытой многоканальной системы массового обслуживания (СМО), имеющей m обслуживающих устройств (каналов) одинаковой производительности с экспоненциально распределенным временем обслуживания. Входной поток требований в этом случае является суперпозицией произвольного числа компонент h , каждая из которых представляет собой пуассоновский поток заявок, обслуживаемых в порядке очереди. Для каждого типа требований, поступающих в систему из j -го источника, действует своё ограничение на длину очереди ε_j , при этом $\varepsilon_0 < \varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \dots < \varepsilon_h$. В работах [1,2] был дан достаточно подробный вывод основных числовых характеристик дискретных и непрерывных величин, характеризующих системы массового обслуживания этого типа. В настоящей работе приводятся результаты исследования нестационарного режима в СМО данного типа.

2. Исследование нестационарного режима в СМО

Исследование нестационарного режима работы СМО проводилось путем имитационного моделирования в системе GPSS World. По результатам имитационного моделирования СМО при помощи инструментального средства Curve Expert были получены зависимости числовых и временных характеристик СМО от времени моделирования. Полученные функции от времени для различных характеристик модели описываются общей формулой:

$$f(t) = f_{\text{стац}} e^{-\frac{b}{t}},$$

но с разными значениями коэффициента b в каждом отдельном случае. Коэффициент b здесь управляет перемещением крутого участка кривой по оси абсцисс: чем меньше b , тем быстрее устанавливается квазистационарный режим. Значение коэффициента b для характеристик обобщенной модели СМО поликомпонентных потоков при определенном значении параметров модели $m=5$, $\varepsilon_i=5$, $\lambda_i=5$, $\mu=1$, а также при нескольких значениях параметра h приводится в таблице.

Таблица

b	$\bar{n}(t)$	$\bar{l}(t)$	$\bar{t}_{\text{ож}}(t)$	$\bar{t}_{\text{ож}0}(t)$
$h=1$	0,247	26,167	25,391	21,643
$h=2$	0,386	29,05	46,186	29,242
$h=3$	0,176	17,528	67,195	56,673

Поведение числовых и временных характеристик трехкомпонентной модели СМО иллюстрируют графики, приведенные на рис. 1 – 4.

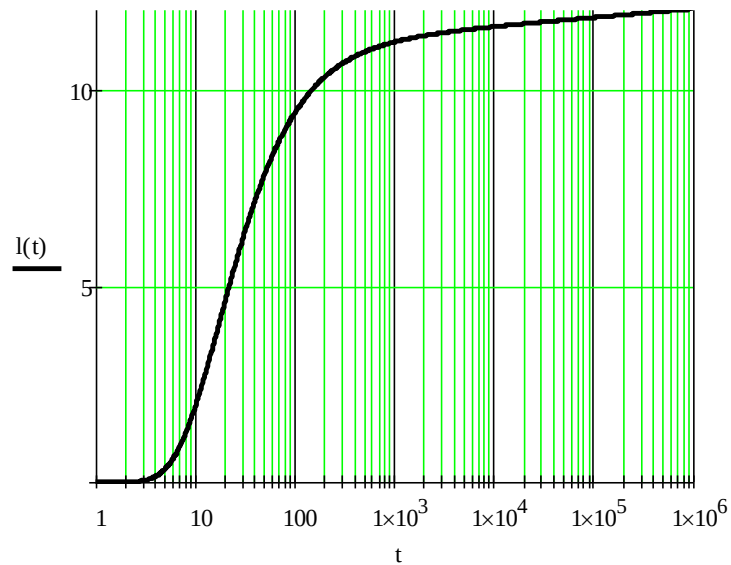


Рис. 1 - Зависимость средней длины очереди от времени моделирования

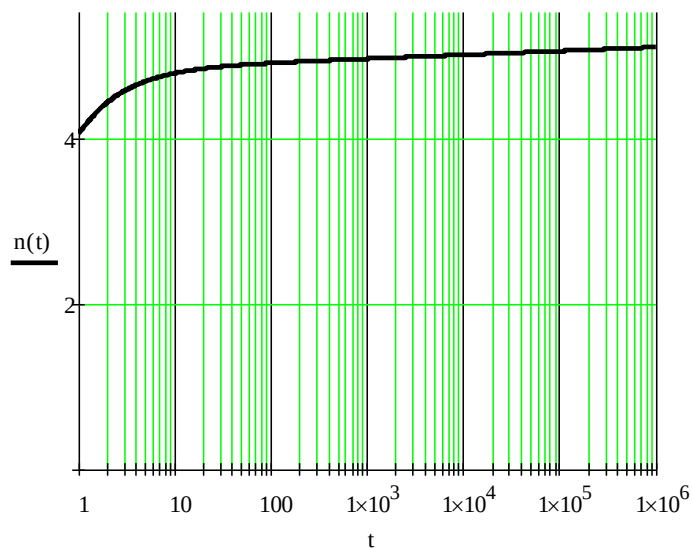


Рис. 2 - Зависимость среднего числа обслуживаемых заявок очереди от времени моделирования

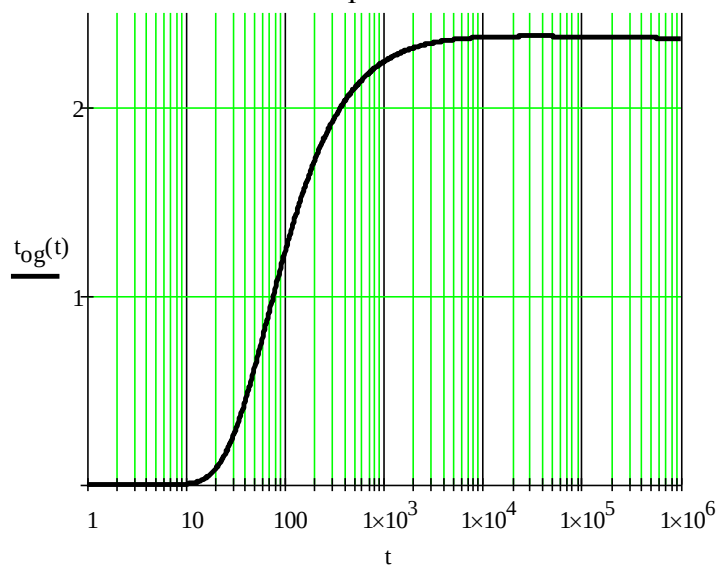


Рис. 3 - Зависимость среднего времени ожидания в очереди от времени моделирования

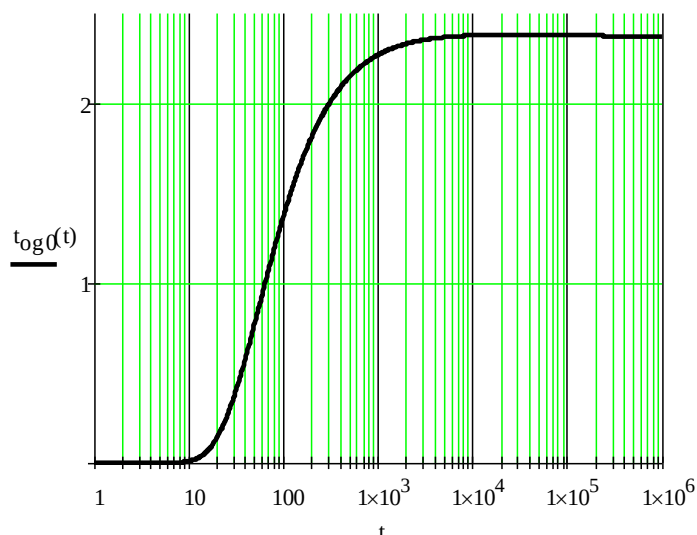


Рис. 4 - Зависимость среднего времени ожидания в физической очереди от времени моделирования

Из графиков очевидно, что квазистационарный режим функционирования в системе устанавливается приблизительно за 1000 единиц модельного времени, равных среднему времени обслуживания заявки одним обслуживающим устройством. При этом отсутствуют резкие колебания значений характеристик СМО в нестационарном режиме. Аналитическое моделирование нестационарного режима функционирования СМО является нецелесообразным с практической точки зрения, поскольку нестационарные значения характеристик СМО не превосходят стационарные значения соответствующих характеристик. Таким образом, стационарный режим является наиболее сложным с точки зрения обеспечения заданной производительности и требует большего количества ресурсов.

Список литературы

1. Kirpichnikov A., Titovtsev A., Mathematical model of a queuing system with arbitrary quantity of sources and size-limited queue, International Journal of Pure and Applied Mathematics, 106, No. 2 (2016), 649–661.
2. Титовцев А.С., Модель массового обслуживания с полным набором накопителей // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 4. С. 102–104.
3. Cohen J.W., Certain delay problems for a full availability trunk group loaded by two sources, Communication News, 16, No. 3 (1956), 105–113.
4. Takagi H., Explicit delay distribution in first-come first-served M/M/m/K and M/M/m/K/n queues and mixed loss-delay system, International Journal of Pure and Applied Mathematics, 40, No. 2 (2007), 185–200.

АННОТАЦИИ
ABSTRACTS

С.В. Анаников, А.Г. Кутузов, И.В. Логинова
ОБОБЩЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ КОНЕЧНОГО ЦИЛИНДРА.
СООБЩЕНИЕ 2. НЕКОТОРЫЕ ЧАСТНЫЕ РЕШЕНИЯ

Ключевые слова: теплопроводность, граничные условия, тепловой поток, сочетание решений.

В работе приводится ряд частных решений, вытекающих из обобщенного решения задачи теплопроводности для конечного цилиндра при различных сочетаниях зависимостей начальных и граничных условий от цилиндрических координат и времени - r, z, t . Эти решения переходят в известные классические решения более простых задач.

Б.Н. Иванов, Р.Н. Костромин, Р.Х. Шагимуллин, В.С. Минкин
АЛГОРИТМ РАЦИОНАЛЬНОГО ВНУТРИПЛАСТОВОГО
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ
И БИТУМИНОЗНЫХ НЕФТЕЙ. СООБЩЕНИЕ 1.
ОБОСНОВАНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Ключевые слова: тяжелые и битуминозные нефти, вещественно-волновая природа, равновесное и критическое состояния.

Запасы тяжелых и битуминозных нефтей по отношению к легко извлекаемым запасам непрерывно возрастают, а добыча таких нефтей сопровождается большими техническими трудностями и экономическими затратами. В мировой практике идет непрерывный поиск новых и совершенствование известных методов их добычи. Одними из наиболее эффективных технологий является газовый, паровой и парожидкостной варианты нефтедобычи заключающиеся во внутрипластовой термической и термальной обработках. В последнее время предлагается использовать дополнительный ввод каталитических систем. В данной статье авторами рассматриваются теоретические основы применения приемов внутрипластового преобразования высоковязких и битумных нефтей с использованием каталитических флюидов в равновесных и критических состояниях.

И.М. Ажмухамедов, Е.В. Мельников
ОЦЕНКА ХЭМИНГОВОГО РАССТОЯНИЯ СЕГМЕНТНЫХ
КОДОВ МАКСИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ

Ключевые слова: коды максимальной длины, n_0 -сегмент кода максимальной длины, спектр кода, минимальное Хэммингово расстояние, остаточная вероятность, псевдослучайная последовательность.

В работе впервые на основе известной границы Варшавова-Гильберта получены некоторые аналитические оценки минимального кодового расстояния d_m для сегментов кода максимальной длины, которые позволяют обеспечить весьма малую вероятность необнаруженной ошибки при синхронизации датчиков псевдослучайных последовательностей специальных систем связи.

С.А. Вологжанина, А.П. Петкова, А.Ф. Иголкин,
А.А. Перегудов
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ
СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Ключевые слова: обработка информации, оценка механических свойств, альтернативные сварочные материалы.

Отдельным этапом при проведении экспериментальных исследований и получении большого объема данных является обработка полученной информации. Использование сравнительного анализа при обработке информации позволило оценить влияние состава материала шва и сварных материалов на химический состав и свойства сварного соединения.

S.V. Ananikov, A.G. Kutuzov, I.V. Loginova
COMMON SOLUTION OF HEAT CONDUCTION TASK FOR
END CYLINDER. COMMUNICATION 2. SOME
PARTICULAR SOLUTION

Keywords: heat conduction, local heat stream, combination of boundary condition.

This work contain line solutions of tasks of heat conduction following of common solution task for end cylinder presented in communication 1. The solutions obtained by variable combinations initial and boundary conditions in function cylindric coordinates and time - r, z, t . Obtained correlations lead to known classical solutions more simple tasks of all.

B.N. Ivanov, R.N. Kostromin, R.Kh. Shagimullin, V.S. Minkin
ALGORITHM FOR RATIONAL INPLAST TRANSFORMATION OF HIGH-VISCOUS AND
BITUMINOUS OILS. MESSAGE 1. JUSTIFICATION AND
STATEMENT OF TASKS

Keywords: heavy and bituminous oils, material-wave nature, equilibrium and critical states.

The reserves of heavy and bituminous oils in relation to easily recoverable reserves are constantly increasing, but the production of such oils is accompanied by great technical difficulties and economic costs. In world practice, there is a continuous search for new methods for their extraction and improvement of methods that are already in use. Some of the most effective technologies are gas, steam and vapor-liquid variants of oil production consisting in heat and thermal treatments of oil reservoirs. Recently, it is proposed to use an additional input of catalytic systems. In this article, the authors consider the theoretical basis for the application of in-situ conversion methods for high-viscosity and bituminous oils using catalytic fluids in equilibrium and critical states.

I.M. Azhmukhamedov, E.V. Melnikov
EVALUATION OF THE HEMING DISTANCE OF SEGMENT
CODES OF THE MAXIMUM LENGTH

Keywords: codes of maximum length, n_0 -segment of code of maximum length, code spectrum, minimum Hamming distance, residual probability, pseudorandom sequence.

This paper for the first time, on the basis of the well-known Varshamov-Hilbert boundary, some analytical estimates of the minimum code distance d_m for code segments of maximum length are obtained, which make it possible to ensure a very low probability of undetected error when synchronizing sensors of pseudorandom sequences of special communication systems.

S.A. Vologzhanina, A.P. Petkova, A.F. Igolkin,
A.A. Peregudov
COMPARATIVE ANALYSIS OF DATA IN ASSESSMENT
OF PROPERTIES OF MATERIALS OF WELDED
CONNECTIONS

Keywords: information processing, evaluation of mechanical properties, alternative welding materials.

A separate step in conducting experimental studies and obtaining a large amount of data is the processing of the information obtained. The use of comparative analysis in the processing of information made it possible to evaluate the influence of the composition of the weld material and welded materials on the chemical composition and properties of the welded joint.

А.А. Емельянов, В.В. Малышев, А.В. Старков,
Л.А. Гришанцева, К.И. Зубкова, Зай Яр Вин
АНАЛИЗ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ В ЗАДАЧЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПОТОКОВ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЗЗ

Ключевые слова: информационная система, обработка данных, ДЗЗ, эффективность, время, стоимость.

Представлены результаты системного анализа функционирования космических систем ДЗЗ в части анализа и формирования показателей эффективности для решения задачи оптимизации распределения потоков целевой. Предлагается осуществить от системных показателей эффективности к интегральным. В качестве интегральных показателей обосновывается выбор времени и стоимости обработки информации.

А.А. Емельянов, В.В. Малышев, А.В. Старков,
Л.А. Гришанцева, К.И. Зубкова, Зай Яр Вин
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПОТОКОВ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЗЗ

Ключевые слова: программно-моделирующий комплекс, время, стоимость, экспериментальная обработка данных, ДЗЗ, космический и наземный сегмент.

Представлены основные результаты экспериментальной отработки решения задачи оптимизации распределения потоков целевой в информационном сегменте системы ДЗЗ. Описаны основные компоненты программно-моделирующего комплекса для формализация процессов обработки и передачи данных, а также организации моделирования. Проведена демонстрация результатов его работы в условиях, приближенных к реальным.

С.И. Лаптев, С.Н. Антропов, А.П. Буйносов
РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ТЕЛЕЖКИ ГАЗОТУРБОВОЗА
КАК СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМОЙ СИСТЕМЫ

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, газотурбовоз, тележка, система, статика, пределенность, прочность, расчет.

В статье приводятся основные принципы теоретического расчета прочности тележки экипажной части современного газотурбовоза. Тележка железнодорожного подвижного состава рассматривается как статически определяемая система.

С.А. Канаев, А.С. Конькова, М.Ю. Молозина,
О.В. Москаленко, А.В. Торчинская
ЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК СТЕНДА КАЛИБРОВКИ И
ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ПОРТАТИВНЫХ
ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИХ СПИРОГРАФОВ И
СПИРОАНАЛИЗАТОРОВ

Ключевые слова: электронный блок, шаговый электропривод, калибровка и термокомпенсация, поверка, спирометры и спироанализаторы.

В статье представлен состав стенда калибровки и термокомпенсации спирографов и спироанализаторов. Приведены основные функции электронного блока стенда. Рассмотрены особенности его схемной и конструктивной реализации.

С.В. Леонтьев, П.Е. Бессонова
ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СТРОИТЕЛЬНОГО
КОНГЛОМЕРАТА МЕТОДОМ ДВУХФАКТОРНОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ключевые слова: оптимизация, автоклавный газобетон, «горбушиный» шлам, планирование эксперимента.

В работе представлены результаты корректировки функциональной модели газобетона автоклавного твердения с

A.A. Emel'yanov, V.V. Malyshev, A.V. Starkov,
L.A. Grishantseva, K.I. Zubkova, Zay Yar Win
ANALYSIS AND GENERATION OF PERFORMANCE
INDICATORS IN THE PROBLEM OF FLOW
DISTRIBUTION TARGET INFORMATION IN THE
OPERATION OF ERS DATA PROCESSING

Keywords: information system, data processing, remote sensing, efficiency, time, cost

This paper presents the results of a system analysis of the functioning of space remote sensing systems in terms of analysis and formation of performance indicators to solve the problem of optimizing the distribution of target flows. It is proposed to implement a system of performance indicators to the integral. The choice of time and cost of information processing is justified as integral indicators.

A.A. Emel'yanov, V.V. Malyshev, A.V. Starkov,
L.A. Grishantseva, K.I. Zubkova, Zay Yar Win
MATHEMATICAL MODEL OF FUNCTIONING OF THE
GROUND SEGMENT IN DISTRIBUTED REMOTE OF ERS
DATA PROCESSING

Keywords: software-modeling complex, time, cost, experimental data processing, remote sensing, space and ground segment.

This paper presents the main results of the experimental development of the solution of the problem of optimization of the distribution of target flows in the information segment of the remote sensing system are presented. The main components of the software-modeling complex for the formalization of data processing and transmission, as well as the organization of modeling are described. A demonstration of the results of its work in conditions close to real.

S.I. Laptev, S.N. Antropov, A.P. Buinosov
STRENGTH CALCULATION OF BOGIE LOCOMOTIVE AS
STATICALLY DETERMINATE SYSTEM

Keywords: railway transport, gas turbine, truck, system, statics, certainty, strength, calculation.

The article presents the basic principles of theoretical calculation of the strength of the truck crew of the modern gas turbine. The trolley of railway rolling stock is considered as a statically defined system.

S.A. Kanaev, A.S. Konkova, M.U. Molozina,
O.V. Moskalenko, A.V. Torchinskaya
ELECTRONIC UNIT OF STAND OF CALIBRATION AND
THERMAL COMPENSATION OF PORTABLE
THERMOANEMOMETRIC SPIROGRAPHERS AND
SPIROANALYZERS

Keywords: electronic unit, step electric drive, calibration and thermal compensation, calibration, spirometer and spiroanalysers.

The article presents the composition of the calibration and thermal compensation stand of spirographs and spiroanalysers. The main functions of the electronic unit of the stand are given. The features of its the schematic and design implementation are considered.

S.V. Leontev, P.E. Bessonova
OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF
CONSTRUCTION CONGLOMERATE BY THE TWO-
FACTORY EXPERIMENTAL PLANNING METHOD

Keywords: optimization, autoclaved aerated concrete, building conglomerate, two-factor experiment planning.

The results of adjusting the functional model of autoclaved aerated concrete using the experimental design method are

использованием метода планирования эксперимента. Описана технологическая схема использования «горбушного» шлама при изготовлении автоклавного газобетона. Выделены факторы, оказывающие влияние исследуемого отхода производства на основные характеристики готового продукта. Определено оптимальное содержание в газобетонной смеси «горбушного» шлама с учетом его плотности для получения необходимых эксплуатационных характеристик выпускаемой продукции.

В.А. Шаманов, М.А. Горкунова
ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ
КАЧЕСТВОМ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА В
УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЪЮНКТУРЫ РЫНКА

Ключевые слова: газобетон, качество, комплексное
оценивание, управление, конъюнктура.

В работе рассмотрены варианты управления качеством неавтоклавнога газобетона с использованием механизмов комплексного оценивания. Показано, что неавтоклавнога газобетон по комплексному показателю качества уступает газобетону автоклавнога твердения. Для уравнивания позиций газобетона автоклавнога и неавтоклавнога твердения предлагаются различные варианты управления: путем изменения теплотехнических характеристик или эксплуатационных характеристик, включая конструктивное качество и долговечность материала.

Е.В. Акиндинова, В.Е. Чернов, О.В. Зеткина
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РАСЧЕТАХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ДВУХАТОМНЫХ НЕПОЛЯРНЫХ МОЛЕКУЛ

Ключевые слова: модель объединенного атома, полярность, молекулярная орбиталь, двухатомные молекулы.

В работе описан метод вычисления динамических полярностей молекул. Рассмотрена реализация численного алгоритма с разделением интегралов по угловым и радиальным переменным.

И.Р. Бадретдинов, И.Л. Кузнецов, Л.С. Сабитов,
Л.Ш. Ахтямова
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ
УПРУГО ОПЕРТЫХ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ
ОТКРЫТОГО СЕЧЕНИЯ РЕШЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ
БАШЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

Ключевые слова: тонкостенные стержни, опоры переменного сечения, напряженно-деформированное состояние стержня переменного сечения, устойчивость стержня.

Авторами предложены уравнения для расчета на устойчивость и прочность тонкостенных стержней открытого сечения с шарнирным опиранием торцов обобщаются на задачи с граничными условиями, соответствующими упругому взаимодействию с соседними элементами конструкции. Данная методика реализована в авторском программном комплексе AutoRSS.05.

И.Н. Бояршинова, М.Р. Бекмансуров
МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ключевые слова: оптимальное проектирование, топологическая оптимизация, параметрическая оптимизация, рамная конструкция, метод Нелдера-Мида.

Работа посвящена развитию и совершенствованию двухэтапной методики оптимального проектирования конструкций, изложенной в статьях [1, 2]. На основе данных, полученных в ходе этапа топологической оптимизации, построена конструкция из балок, для которой на втором этапе осуществляется параметрическая оптимизация с целью снижения веса. В данной работе задача параметрической оптимизации решалась при помощи метода Нелдера-Мида, для чего в пакете Ansys Mechanical APDL была

presents. The technological scheme of the use of "humpback" sludge in the manufacture of autoclaved aerated concrete is described. The factors influencing the studied production waste on the main characteristics of the finished product are identified. The optimal content of "humpback" sludge in the aerated concrete mixture was determined taking into account its density to obtain the necessary performance characteristics of the products.

V.A. Shamanov, M.A. Gorkunova
DECISION SUPPORT FOR AERATED CONCRETE
QUALITY CONTROL IN CHANGING MARKET
CONDITIONS

Keywords: aerated concrete, quality, integrated assessment, control, market conditions.

The variants of quality control of non-autoclaved aerated concrete with the use of integrated assessment mechanisms are considered. It is shown that non-autoclaved aerated concrete is inferior to autoclaved aerated concrete in terms of complex quality index. To equalize the positions of autoclaved and non-autoclaved aerated concrete, various control options are offered: by changing the thermal characteristics or performance characteristics, including the structural quality and durability of the material.

E. V. Akindinova, V.E. Chernov, O.V. Zetkina
MATHEMATICAL MODELING IN THE CALCULATION OF
THE ELECTROMAGNETIC CHARACTERISTICS OF
DIATOMIC NON-POLAR MOLECULES

Keywords: united atom model, polarizability, molecular orbital, diatomic molecules

The paper describes a method for calculating the dynamic polarizability of molecules. The implementation of a numerical algorithm with the separation of integrals by angular and radial variables is considered.

I.R. Badretdinov, I.L. Kuznetsov, L.S. Sabitov,
L.S. Ahtyamova
DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR
CALCULATION OF THE STABILITY OF ELASTICALLY
SUPPORTED THIN-WALLED BEAMS OF OPEN CROSS-
SECTION IN LATTICE STRUCTURES TOWER
STRUCTURES

Keywords: thin-walled rods, supports of variable cross-section, stress-strain state of the rod of variable cross-section, stability of the rod.

The authors propose equations for calculating the stability and strength of thin-walled rods of open cross-section with a hinge support of the ends are generalized to the problems with boundary conditions corresponding to the elastic interaction with neighboring structural elements. This technique is implemented in the author's software package AutoRSS.05.

I.N. Boyarshinova, M.R. Bekmansurov
METHODS OF OPTIMAL DESIGN OF FRAME
STRUCTURES

Keywords: optimal design, topologic optimization, parametric optimization, frame structure, Nelder-Mead method.

The work is devoted to the development and improvement of a two-stage methodology for the optimal design of structures described in articles [1, 2]. Based on the data obtained during the stage of topological optimization, a structure of beams is constructed for which, at the second stage, parametric optimization is carried out in order to reduce weight. In this paper, the parametric optimization problem was solved using the Nelder-Mead method [3], for which a special program was written in the Ansys Mechanical APDL package that implements the algorithm of this method. A comparative analysis of the built-

написана специальная программа, реализующая алгоритм этого метода. Проведен сравнительный анализ работы встроенного в SolidWorks метода параметрической оптимизации и написанного в Ansys Mechanical ADPL алгоритма Нелдера-Мида. Применение методики с использованием метода Нелдера-Мида дает существенную экономию затрат на проектирование.

А.П. Буйносов, К.А. Вахрушев
ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ КОЛЕИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ПУТИ НА УСЛОВИЯ СВОБОДНОГО ВПИСЫВАНИЯ
ТЕЛЕЖЕК ЛОКОМОТИВОВ

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, локомотив, тележка, колесная пара, путь, ширина, свобода, вписывание, влияние.

В статье приводятся результаты анализа влияния ширины колеи железнодорожного пути на свободное прохождение двухосной тележки локомотива. Показано, что принятая ширина колеи в криволинейных участках железнодорожного пути, радиусом менее 650 м, не соответствует условиям свободного вписывания тележек локомотивов.

Г.М. Гузайров, Н.А. Мунасыпов
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ НА ГРУППЕ ЛОРЕНЦА
И КОМПЛЕКСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
КОНТОРОВИЧА-ЛЕБЕДЕВА

Ключевые слова: представления группы Лоренца, преобразования Фурье на группе, гипергеометрические функции Бесселя, преобразования Конторовича-Лебедева.

Представления группы Лоренца можно реализовать интегральными операторами с помощью разложения функций на C в комплексный интеграл Фурье. Ядра этих интегральных операторов выражаются через гипергеометрические функции Бесселя. Здесь получена новая пара взаимно обратных интегральных преобразований функций на C с этими ядрами.

А.О. Казакова
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ В ОДНОРОДНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ
ТЕЛЕ МНОГОСВЯЗНОГО СЕЧЕНИЯ

Ключевые слова: стационарное распределение температуры, многосвязная область, уравнение Лапласа, метод граничных элементов.

Рассматривается плоская задача о стационарном распределении температуры в однородном цилиндрическом теле произвольного многосвязного сечения. Задача описывается уравнением Лапласа для температуры в многосвязной плоской области. Для решения задачи предложено использование модификации метода граничных элементов, обладающей экспоненциальной сходимостью. Рассмотрены примеры для областей, ограниченных круглыми, эллиптическими и прямоугольными контурами. На тестовом примере показана эффективность алгоритма.

Т.К. Ксенофонтова
РАСЧЕТ ПОДЗЕМНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБ С
УЧЕТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПО
МЕТОДУ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ
РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ (МФА)

Ключевые слова: подземные железобетонные трубы, реактивный отпор грунта, метод конечных элементов, цилиндрическая анизотропия грунтового основания.

В статье приведен алгоритм расчета подземных железобетонных труб на основе использования метода функциональной аппроксимации расчетных параметров (МФА), позволяющий с помощью программных комплексов учитывать в расчете реактивное сопротивление грунта при изменении его характеристик по кольцу трубы (цилиндрическая анизотропия грунтового основания).

in SolidWorks parametric optimization method and the Nelder-Mead algorithm written in Ansys Mechanical ADPL is carried out. Application of the method using the Nelder-Mead method provides significant savings in design costs.

A.P. Buinosov, K.A. Vakhrushev
INFLUENCE OF GAUGE WIDTH TRAIN TRACKS TO THE
TERMS OF FREE FIT TRUCKS LOCOMOTIVES

Keywords: railway transport, locomotive, truck, wheel pair, way, width, freedom, entry, effect.

The article presents the results of the analysis of the influence of the gauge of the railway track on the free passage of the biaxial locomotive bogie. It is shown that the adopted track width in the curved sections of the railway track, with a radius of less than 650 m, does not meet the conditions of free entry of locomotive trolleys.

G.M. Guzairov, N.A. Munasypov
THE REPRESENTATIONS OF THE LORENTZ GROUP AND
DECOMPOSITION OF FUNCTIONS ON C BY BESSELS
FUNCTIONS

Keywords: representations of the Lorentz group, Fourier transform on the group, Bessel hypergeometric functions, Kontorovich-Lebedev transformations.

Representations of the Lorentz group can be realized by integral operators using the decomposition of functions in C into a complex Fourier integral. The kernels of these integral operators are expressed in terms of the Bessel hypergeometric functions. A new pair of mutually inverse integral transformations of functions on C with these kernels is obtained here.

A.O. Kazakova
NUMERICAL MODELLING OF THE TEMPERATURE
DISTRIBUTION IN A HOMOGENEOUS CYLINDRICAL
BODY OF MULTIPLY-CONNECTED CROSS-SECTION

Keywords: stationary temperature distribution, multiply-connected domain, Laplace equation, boundary element method. The plane problem of the stationary temperature distribution in a homogeneous cylindrical body of arbitrary multiply-connected cross-section is considered. The problem is described by the Laplace equation for temperature in multiply-connected plane domain. For solving the problem it is proposed to use a modification of the boundary element method with exponential convergence. The examples for the domains bounded by circular, elliptical and rectangular contours are considered. The test example shows the efficiency of the algorithm.

T.K. Ksenofontova
CALCULATION OF UNDERGROUND CONCRETE PIPES
WITH CONSIDERATION OF CYLINDRICAL ANISOTROPY
BY THE METHOD OF FUNCTIONAL APPROXIMATION OF
THE ESTIMATED PARAMETERS (MFAEP)

Keywords: underground reinforced concrete pipes, reactive ground resistance, finite element method, cylindrical anisotropy of the soil base.

In article the algorithm of calculation of underground reinforced concrete pipes based on the use of the method of functional approximation of the estimated parameters (IPA) that enables the use of software systems to take into account in the calculation of the reactive resistance of the soil to change its characteristics according to the ring tube (cylindrical anisotropy of the Foundation soil).

А.С. Титовцев

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА В
СИСТЕМАХ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ ПОТОКОВ

Ключевые слова: очередь, качество обслуживания, система
массового обслуживания, $M/M/m/K$, обслуживающее
устройство.

В статье представлены результаты исследования нестационарного режима в открытой многоканальной системе массового обслуживания, имеющей m обслуживающих устройств одинаковой производительности с экспоненциально распределенным временем обслуживания. Входной поток, носящий пуассоновский характер, включает в себя заявки разных типов, поступающих из произвольного количества источников h и имеющих различные ограничения по длине очереди. Изучено поведение характеристик системы в нестационарном режиме.

A.S. Titovtsev

STUDY OF NON-STATIONARY MODE IN QUEUEING
SYSTEMS MULTICOMPONENT FLOWS

Keywords: queue, quality of service (QoS), queueing system (QS),
 $M/M/m/K$, service facility.

The article presents the results of the study of non-stationary mode in an open multichannel Queueing system with m service devices of the same performance with exponentially distributed service time. The input stream, which is of Poisson nature, includes applications of different types coming from an arbitrary number of sources h and having different restrictions on the queue length. The behavior of the characteristics of the system in a non-stationary mode is studied.

Публичный лицензионный договор-оферта о правах на статью

Редакция журнала «Научно-технический вестник Поволжья» предлагает Вам присылать свои статьи для публикации на страницах журнала, а также на сайте Научной электронной библиотеки (НЭБ). Предоставление Автором своего произведения является полным и безоговорочным акцептом, т.е. данный договор считается заключенным с соблюдением письменной формы. Присылая для публикации произведение, Автор также предоставляет Редакции журнала права на использование произведения и гарантирует, что он обладает достаточным объемом прав на передаваемое произведение. Также Автор предоставляет редакции журнала право переуступить на договорных условиях частично или полностью полученные по настоящему Договору права третьим лицам без выплаты Автору вознаграждения. Все авторские права регулируются в соответствии с действующим законодательством России.

Договор публичной оферты по обработке персональных данных

В процессе осуществления выпуска журнала "Научно-технический вестник Поволжья", ООО "Рашин Сайнс" осуществляется обработка персональных данных, предоставленных авторами статей в рамках сообщения своих регистрационных данных для осуществления публикации в журнале (имя, фамилия, отчество, адрес автора, контактный телефон и e-mail приводятся в регистрационной форме, заполняемой авторами при отправке статьи в журнал). Обработка осуществляется редакцией журнала для целей надлежащей отправки журнала автору и возможности связи с автором лиц, заинтересованных в результатах труда автора статьи. Под обработкой персональных данных в контексте настоящего согласия понимаются действия редакции по сбору, систематизации, накоплению, хранению, использованию, распространению, уничтожению персональных данных, а также действия по их дальнейшей обработке с помощью автоматизированных систем управления базами данных, и иных программных средств, используемых редакцией журнала. Настоящее согласие автора на обработку персональных данных является бессрочным и может быть отозвано в любой момент путем отказа автора от получения журнала и дальнейшей обработки его персональных данных.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ**

№8 2019

Направления:

**05.13.01 – СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ (технические науки)**

**05.13.06 – АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ
(технические науки)**

**05.13.11 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (физико-математические науки)**

**05.13.11 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (технические науки)**

**05.13.18 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫЕ
МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ (технические науки)**

**05.13.19 – МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ,
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(физико-математические науки)**

www.ntvp.ru

Реестровая запись от 08.05.2019 серия ПИ № ФС 77 -75732
Подписано в печать 23.08.2019 Формат А4. Печать цифровая.
Дата выхода в свет 23.08.2019
4,6 усл.печ.л. 5,3 уч.изд.л. Тираж 500 экз. Заказ 2170.

Учредитель: ООО "Рашин Сайнс":
420111, г. Казань, ул. Университетская, 22, помещение 23.
Адрес редакции, издательства, типографии – ООО "Рашин Сайнс":
420111, г. Казань, ул. Университетская, 22, помещение 23.
Цена свободная.

© Рашин Сайнс
тел. (843) 216-30-35
Отпечатано с готового оригинал-макета
ООО «Рашин Сайнс»