

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА
AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Крупский Р. Ф., Кривенок А. А., Станкевич А. В., Феоктистов С. И., Бельх С. В.
R. F. Krupsky, A. A. Krivenok, A. V. Stankevitch, S. I. Feoktistov, S.V. Belykh

**ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПРОФИЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК С ПОМОЩЬЮ
ЛИСТОВОГО ОБТЯЖНОГО ПРЕССА**

SHAPING PROFILE BLANKS AT A SHEET STRETCH-FORMING PRESS

Крупский Роман Фадеевич – кандидат технических наук, начальник научно-производственного отдела филиала ОАО "Компания "Сухой" "КнААЗ им. Ю.А. Гагарина" (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская, 1; 7(4217)526385

Mr. Roman F. Krupskiy – PhD in Engineering, Head of Research and Production at the branch of OJSC "Sukhoi Company" - "Yuri Gagarin Aircraft Building Plant", Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 681018, 1 Soviet Str., phone: +7 4217 526385.

Кривенок Антон Александрович – программист научно-производственного отдела филиала ОАО "Компания "Сухой" "КнААЗ им. Ю.А. Гагарина" (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская, 1; +7(4217)526385

Mr. Anton A. Krivenok – programmer, Research and Production, at the branch of OJSC "Sukhoi Company" - "Yuri Gagarin Aircraft Building Plant", Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 681018, 1 Soviet Str., phone: +7 4217 526385.

Станкевич Антон Владиславович – кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории технологических процессов филиала ОАО "Компания "Сухой" "КнААЗ им. Ю.А. Гагарина" (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская, 1; 7(4217)526385

Mr. Anton V. Stankevitch — PhD in Engineering, Head of Research and Production Lab for Manufacturing Processes, at the branch of OJSC "Sukhoi Company" - "Yuri Gagarin Aircraft Building Plant", Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 681018, 1 Soviet Str., phone: +7(4217)526385.

Феоктистов Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, декан самолетостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 7(4217)241190. E-mail: ssf@knastu.ru

Mr. Sergei I. Feoktistov – Doctor of Engineering, Professor, Dean of the Aircraft Building Faculty, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 681013, 27 Lenin Str.; phone: +7 4217 241190. E-mail: ssf@knastu.ru

Бельх Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 79141795213. E-mail: belykhsv@knastu.ru

Mr. Sergei V. Belykh – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Aircraft Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 681013, 27 Lenin Str.; phone: +7 914 179521. E-mail: belykhsv@knastu.ru

Аннотация. Приведены результаты обработки технологии изготовления детали из пресованного профиля методом изгиба с растяжением с использованием обтяжного пресса FET-1500, а также результаты численного моделирования процесса изготовления в программе MSC.MARC. Рассмотрены вопросы определения траектории движения губок пресса в процессе формообразования.

Summary. The paper presents further development of a method for manufacturing extruded profile parts by the processes of bending and stretching at the FET-1500 stretch-forming press. We also offer the results of numerical simulation of the manufacture process carried out in the MSC.MARC software package. The problem of determining the trajectory of press sponge media's movement in shaping is considered.

Ключевые слова: прессованный профиль, изгиб, фрезерование, пружинение, напряжения.

Key words: extruded sections, bending, milling, springing, stress.

УДК 621.7.043, 629.73.002

Формообразование прессованных профилей методом гибки с растяжением традиционно выполняется с помощью профилегибочно-растяжных станков типа ПГР (см. рис. 1). Такой процесс обеспечивает формирование изогнутых профильных заготовок с равномерным распределением остаточных напряжений, и, следовательно, с минимальным пружинением, обеспечивающим необходимую точность деформируемой детали. В условиях отсутствия оборудования, способного развивать необходимые усилия для формообразования профильных заготовок большого сечения, опробована возможность реализации этого процесса на листовом прессе поперечной обтяжки FET-1500 (см. рис. 2).

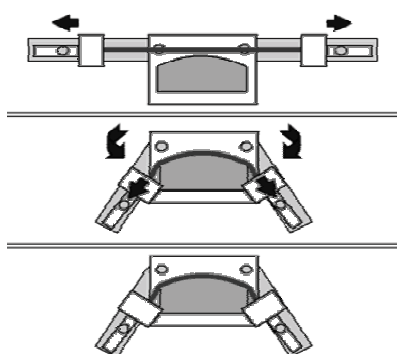


Рис. 1. Стадии процесса обтяжки профиля на ПГР



Рис. 2. Обтяжной пресс FET-1500

Конструкция губок пресса FET-1500 не предусматривает возможности закрепления в них заготовок из профилей, в связи с чем были спроектированы и изготовлены специальные приспособления (см. рис. 3).

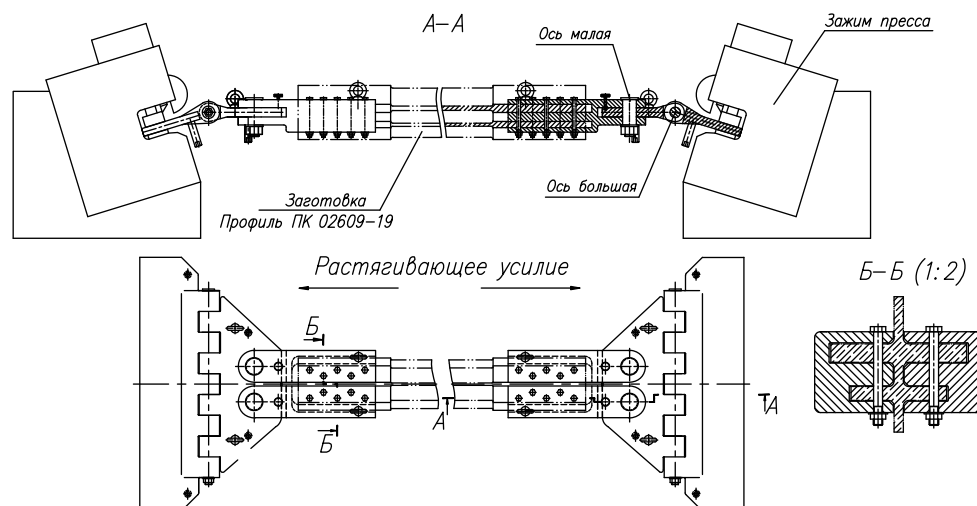


Рис. 3. Приспособление для закрепления заготовки профиля в зажимах пресса FET-1500

При пластическом растяжении профильной заготовки неизбежно искажение её поперечного сечения за счет утяжки растягиваемого материала и за счет потери устойчивости конструктивных элементов сечения профиля. Однако эти негативные явления можно пред-

сказать с помощью моделирования процесса и, следовательно, их учесть. Величина утяжки и пружинение заготовки зависят от программы нагружения, по которой ведется процесс формообразования. Таким образом, технологический процесс гибки с растяжением профильных заготовок заключается в реализации программы нагружения. Программа нагружения пересчитывается в перемещения рабочих органов машины и управляется системой ЧПУ.

Расчет управляющих программ для прессы FET-1500 осуществляется программой S3F-FET, которая предназначена только для листовых заготовок. Поэтому в пакете MathCAD был разработаны функции, позволяющие на основе заданной геометрии пуансона и необходимого удлинения заготовки рассчитать траекторию движения концов заготовки на каждом этапе формообразования.

Выполнение расчетов траектории движения зажимов прессы будет основываться на информации об изменении длины линии центров тяжести заготовки во время деформирования. Величиной, определяющей удлинение материального слоя заготовки, является сообщаемая этому слою относительная деформация ϵ . Траектория гибки заготовки рассчитывается в виде конечного числа интервалов. В процессе расчета каждого интервала необходимо знать текущее удлинение линии центров тяжести.

Для расчета управляющей программы разработан следующий алгоритм:

1. Задать геометрию формообразующей части пуансона.
2. Относительно вершины разбить геометрию пуансона на левый и правый контуры с заданным количеством одинаковых по длине отрезков.
3. Задать удлинение для каждого этапа формообразования.
4. Для каждого узла определить касательную, на которой определить точку, расположенную на соответствующем удалении от вершины.

По теоретическому контуру пуансона, с учетом смещения шарнира от теории контакта с заготовкой и заданным режимом растяжения были рассчитаны траектории движения зажимов. На рис. 4 представлены теоретический контур пуансона в декартовой системе координат прессы и траектории обтяжки с максимальным растяжением 1,5 %.

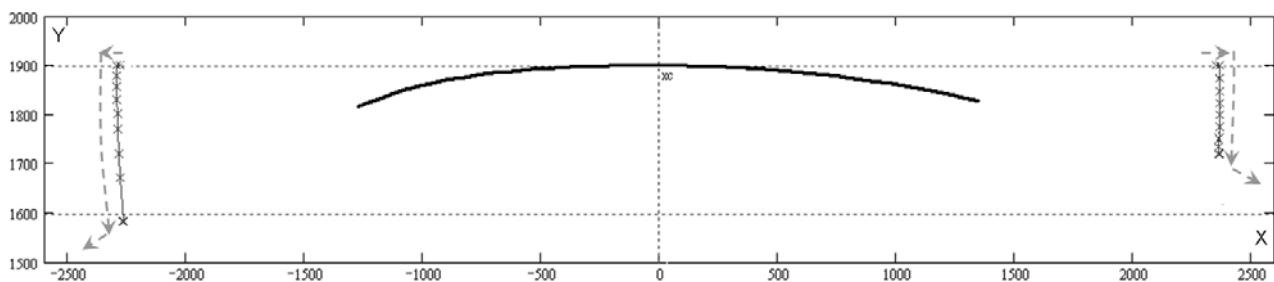


Рис. 4. Теоретический контур пуансона и рассчитанные траектории движения зажимов

Для анализа результатов формообразования по рассчитанной траектории движения концов заготовки с определением напряженно-деформированного состояния заготовки использовался конечно-элементный пакет MSC.Marc. Конечно-элементное моделирование процесса формообразования закаленной заготовки из сплава марки В950чТ2 показало полное прилегание детали к пуансону, что говорит о точности рассчитанных траекторий движения шарниров крепления (см. рис. 5). После разгрузки заготовка имеет незначительное пружинение.

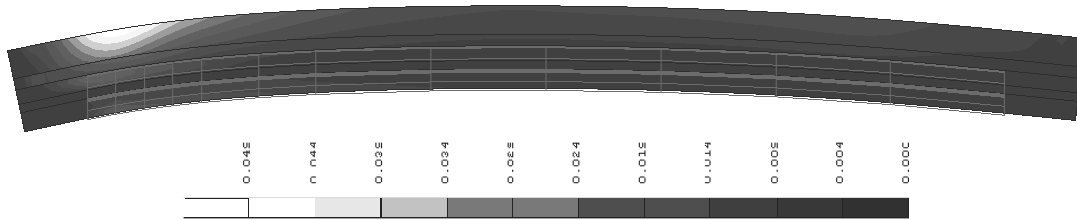


Рис. 5. Распределение по заготовке эквивалентных пластических деформаций

Для реализации процесса формообразования на прессе FET-1500 необходимо рассчитать управляющую программу для ЧПУ по координатам движения шарниров крепления. Программное обеспечение S3F-FET, поставляемое к данному оборудованию (управление прессом и расчет для него управляющих программ), предоставляет информацию только о параметрах рабочих элементов пресса, что недостаточно для определения траектории движения зажима. В связи с этим потребовалось разработать инструмент для перевода координат шарнира крепления в параметры рабочих элементов пресса и наоборот – параметров в координаты.

Для решения этой задачи провели анализ кинематики пресса FET-1500 (см. рис. 6). По результатам проведенного анализа рабочих узлов пресса, мест крепления шарниров определены переменные и постоянные параметры.

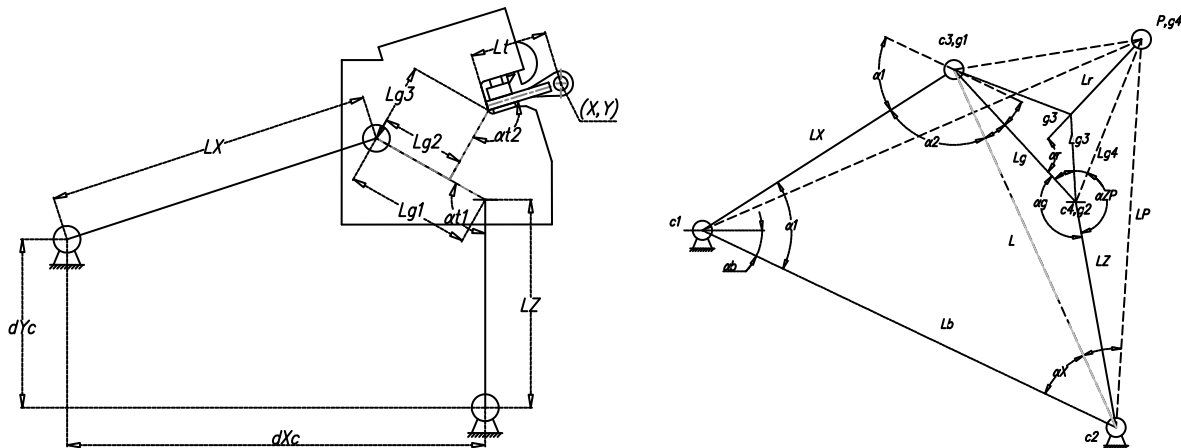


Рис. 6. Кинематическая и математическая модели пресса FET-1500 с креплением

На основании разработанной математической модели в целях автоматизации процесса подготовки управляющих программ для пресса FET-1500 разработали программу, которая выполняет расчет управляющих параметров и координат шарнира с учетом геометрических параметров пресса и крепления заготовки (см. рис. 7).

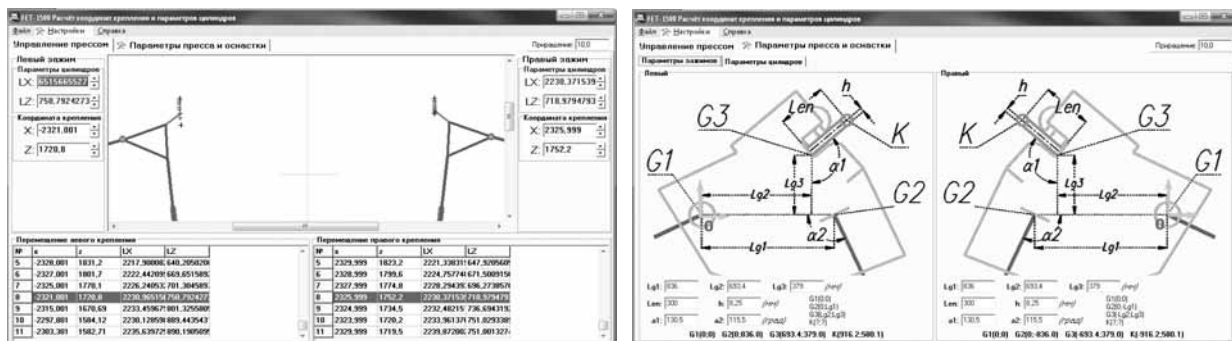


Рис. 7. Интерфейс программы расчета управляющих программ для ЧПУ FET-1500

Для проверки точности численного моделирования и расчёта управляющей программы провели опытное формообразование профиля. После закалки заготовки на верхней и нижней её поверхностях через трафарет были нанесены линии для замера деформации. Затем профиль был установлен в оснастку, зажат в губки прессы и выставлен в начальную позицию. По рассчитанной управляющей программе произвели формообразование заготовки, после чего измерили деформации профиля и сравнили их с расчетными (см. рис. 8 и 9). Уровни расчетных и экспериментальных деформаций имеют схожую локализацию и близкие значения.

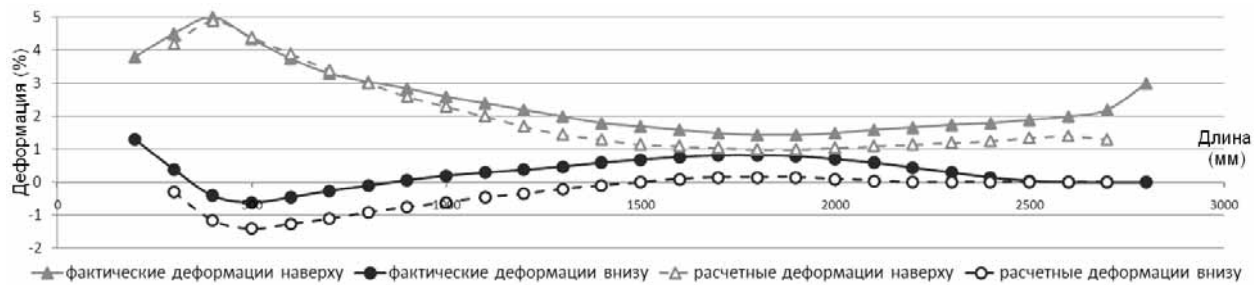


Рис. 8. Распределения пластической деформации по длине заготовки

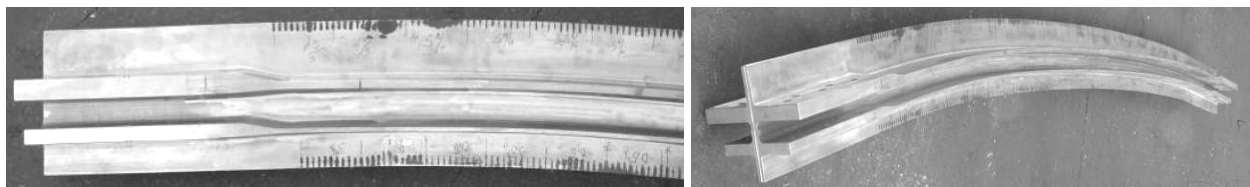


Рис. 9. Формообразованный профиль

Процесс обтяжки профиля, смоделированный численно, в целом практически был повторен на прессе FET-1500. Небольшие различия в результатах эксперимента и расчёта обусловлены люфтами оснастки, погрешностями позиционирования пуансона и установки заготовки на пресс, а также упрощением численной модели (в расчетах не учитывалось трение). В целом полученная деталь удовлетворяет всем предъявляемым требованиям. Проведённая работа на практике показала возможность применения листовых обтяжных прессов для формообразования профильных заготовок, были разработаны инструменты и рекомендации для реализации предложенного технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация технологической подготовки производства летательных аппаратов / С. И. Феоктистов, Е. А. Макарова, В. И. Меркулов [и др.] ; под общ. ред. Е. А. Макаровой. – М. : ЭКОМ, 2001. – 288 с.
2. Аппроксимация геометрии контура дугами при контроле точности изготовления деталей летательных аппаратов / С. И. Феоктистов, С. В. Белых, А. В. Станкевич, А. А. Кривенко, А. А. Перевалов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № I-1(1) – С. 9-15.
3. Marc® 2010 User's Guide, MSC Software Corporation, 2010 – 1946 с.
4. Исследование процесса формообразования алюминиевых стрингеров несимметричного сечения из прессованных профилей самолета SJSJ -100 / С. В. Белых, А. В. Станкевич, А. А. Кривенко // Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении : сб. статей. Вып. 3. Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре : ИМиМ (Институт машиноведения и металлургии) ДВО РАН, 2009. – С. 282-290.

Седельников Г. Д., Ширяев В. Н.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

Седельников Г. Д., Ширяев В. Н.

G. D. Sedelnikov, V. N. Shiryayev

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

ACCOUNTING STUDY EFFICIENCY OF THE COMBINED STEAM AND GAS TURBINE POWER PLANTS



Седельников Геннадий Дмитриевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; 8(4217)241-155. E-mail: ido@knastu.ru

Mr. Gennady D. Sedelnikov - Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Heat&Power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Ave.; phone: + 4217 241155. E-mail: ido@knastu.ru.



Ширяев Владимир Николаевич – студент магистратуры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; 8(4217)241-155. E-mail: ido@knastu.ru

Mr. Vladimir N. Shiryayev – Master of Science student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Ave.; phone: + 4217 241155. E-mail: ido@knastu.ru.

Аннотация. Данная работа посвящена вопросам, связанным с анализом эффективности выработки электроэнергии комбинированными парогазовыми установками. Рассмотрены бинарные установки различных схем и компоновок, комбинированные установки с впрыском пара в газовый тракт (STIG), с паровым приводом компрессора, с утилизационными котлами одного и двух давлений. Представлены результаты параметрической и схемной оптимизации и электрические КПД таких установок.

Summary. The paper is concerned with the problems arising from analysis of efficiency of combined steam and gas turbine power plants. Considered are binary power plants based on different circuit designs and arrangements, such as plants with steam injection into the gas turbine (STIG), plants with a steam-driven compressor, plants equipped with exhaust gas boilers of single and dual pressures. Presented are the results of parametric and circuital optimization; data on the electric efficiency of such power plants are provided.

Ключевые слова: газотурбинная установка, комбинированная парогазовая установка, утилизационный котел, электрическая мощность, паропроизводительность, электрический КПД, оптимизация.

Key words: gas turbine power plant, combined steam and gas turbine power plant, exhaust gas boiler, electric output, steam production capacity, electric efficiency, optimization.

УДК 621.438

Комбинированные бинарные установки, сочетающие в себе преимущества газотурбинных и паротурбинных установок, в последние годы все чаще становятся предметом исследований и оптимизации [1; 2; 3; 4]. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. предусматривает замещение традиционных паротурбинных энергоблоков, работающих на природном газе, на парогазовые установки (ПГУ). Среди различных типов комбинированных установок наиболее перспективными считаются бинарные ПГУ с утилизационными котлами (УК) и

ПГУ с впрыском пара в газовый тракт газотурбинной установки (ГТУ). Первые имеют наибольший КПД по выработке электроэнергии, а вторые – улучшенные экологические показатели и возможности существенной форсировки мощности при приемлемом КПД.

В данной работе исследована эффективность именно таких перспективных ПГУ. Рассматривались следующие варианты установок: бинарная ПГУ, ПГУ с паротурбинным приводом компрессора, ПГУ с впрыском пара в газовый тракт (ПГУ-STIG). Во всех вариантах рассчитывались схемы с УК одного и двух давлений.

Для решения поставленной задачи был использован метод математического моделирования процессов, происходящих в газотурбинной и паротурбинной частях комбинированной установки [2; 5]. В основу расчета УК положена система из уравнений, записанных для следующих его элементов высокого давления (ВД) и низкого давления (НД): пароперегревателей (ППВД и ППНД), испарителей (ИВД и ИНД), сепараторов пара (СВД и СНД), экономайзера (ЭВД), подогревателя конденсата и др. Математические модели и программы реализованы для перечисленных вариантов парогазовых установок, сформированных на базе газотурбинного двигателя ГТУ-110 производства НПО «Сатурн».

При исследовании эффективности ПГУ решалась также задача оптимизации параметров генерируемого в УК пара. Расчеты показали, что температура перегретого пара незначительно влияет на паропроизводительность котла при практически неизменной мощности паровой турбины. С другой стороны, понижение температуры пара дает рост его влагосодержания в конце процесса расширения в турбине (т.е. больше допустимых 12 – 13 %). Поэтому была принята постоянная температура перегретого пара 540 °С.

Как известно, давление пара, производимого УК, оказывает неоднозначное влияние на мощность паровой турбины. По результатам расчетов установки с одноконтурным УК представлен характер изменения адиабатного теплоперепада в турбине H_a , паропроизводительности котла $G_{ук}$ и мощности турбины $N_{пт}$ при изменении давления пара (см. рис. 1). Оптимальное давление пара УК составило около 5 МПа, что соответствует наибольшим значениям мощности паровой турбины, всей ПГУ (154 МВт) и ее КПД (51 %).

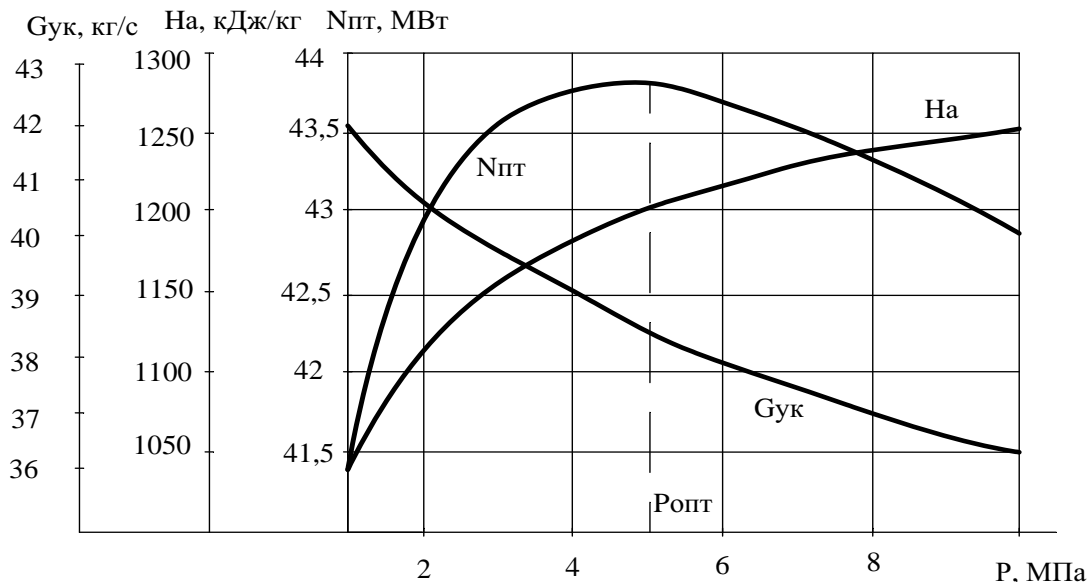


Рис. 1. Результаты оптимизации давления пара одноконтурного УК

Для ПГУ с двухконтурным УК было рассмотрено несколько принципиальных схем расположения тепловоспринимающих поверхностей (см. рис. 2). Схемы *a*, *б* и *в* рассмотрены с целью повышения температуры пара контура НД по сравнению с последовательной схемой (см. рис. 2, *з*). Расчеты показали, что наибольшую эффективность имеет схема ПГУ с после-

довательной компоновкой УК (см. рис. 3), несмотря на то что температура перегретого пара НД в этом варианте имеет наименьшее значение. Это объясняется тем, что при данной конструкции УК основная часть теплоты уходящих газов отдается контуру ВД, а оставшаяся часть утилизируется в контуре НД. Это снижает температуру уходящих в атмосферу газов, дает прирост паропроизводительности УК по сравнению с другими вариантами компоновки котла. Для этого – лучшего – варианта оптимальные параметры пара ВД/НД составили 11/0,15 МПа и 540/200 °С, при которых мощность ПГУ достигает 157 МВт, а ее электрический КПД составляет 52,6 % (см. рис. 3).

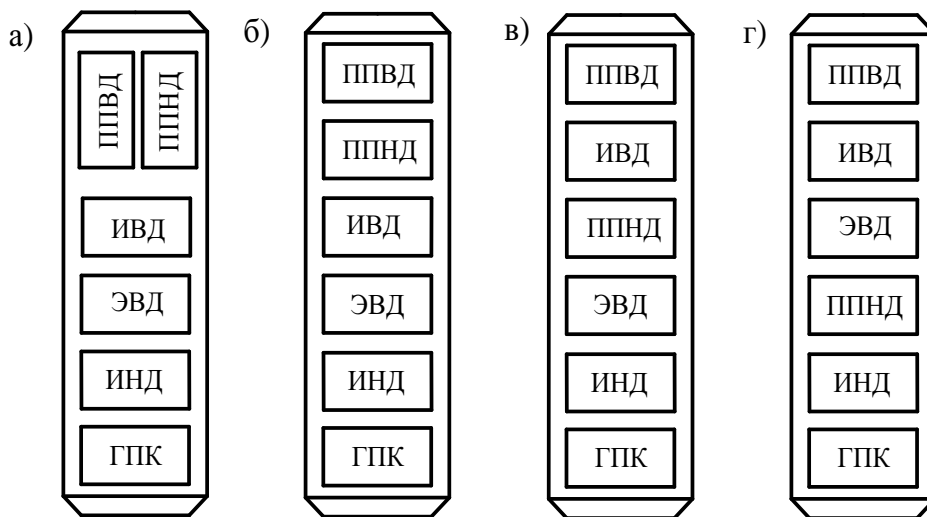


Рис. 2. Принципиальные схемы компоновки УК двух давлений:

- а – ППВД и ППНД в одной температурной зоне; б – ППНД после ППВД;
- в – ППНД после ИВД; г – последовательное расположение контуров ВД и НД

Дальнейшее развитие парогазовых установок связано не только с повышением начальных параметров и увеличением числа контуров УК, но и другими схемными решениями, в частности, с впрыском пара УК в газовый тракт ГТУ (ПГУ-STIG). Пар, впрыскиваемый в камеру сгорания, принято называть экологическим (снижаются выбросы оксидов азота), а в ступени газовой турбины – энергетическим. Основным преимуществом ПГУ-STIG является значительно больший прирост мощности относительно исходной ГТУ, чем в бинарной ПГУ. Этот прирост мощности достигается увеличением расхода рабочего тела (без увеличения мощности на привод компрессора), исключением значительной части расхода сжатого воздуха на охлаждение лопаток и камеры сгорания ГТУ.

В данной работе были рассмотрены несколько вариантов ПГУ-STIG. Это комбинированная установка, работающая по циклу Ченя [3], когда весь генерируемый в УК пар направляется на впрыск в камеру сгорания ГТУ, а также два варианта ПГУ-STIG с предварительным расширением пара в отдельной паровой турбине с котлом одного и двух давлений пара соответственно.

Результаты оптимизации параметров и расчета эффективности ПГУ-STIG с котлом одного и двух давлений пара представлены на рис. 4 и 5.

Уменьшение давления генерируемого пара сопровождается ростом паропроизводительности УК, что повышает КПД парогазовой установки, работающей по циклу Ченя (см. рис. 4). При этом наименьшее давление пара должно быть достаточным для впрыска в камеру сгорания ГТУ. Для ПГУ-STIG по циклу Ченя при параметрах пара 2 МПа и 540 °С и расходом впрыскиваемого пара 4,7 кг на 1 м³ природного газа электрическая мощность получилась 110 МВт и КПД 42 %.

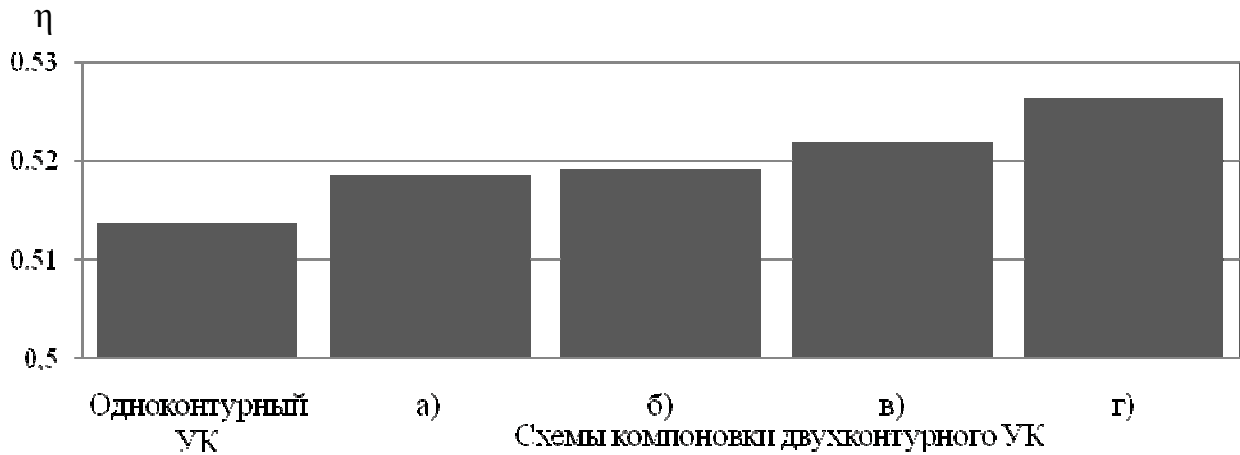


Рис. 3. КПД по выработке электроэнергии бинарных ПГУ:
 а – ППВД и ППНД в одной температурной зоне; б – ППНД после ППВД;
 в – ППНД после ИВД; г – последовательное расположение контуров ВД и НД

В ПГУ-STIG с предварительным расширением вырабатывается дополнительная мощность в паровой турбине, после чего пар впрыскивается в камеру сгорания ГТУ. По этой причине КПД по выработке электроэнергии получается существенно выше и имеет выраженный максимум по давлению пара. Для рассматриваемых условий оптимальное давление пара составило около 9 МПа, что соответствует оптимальному впрыску 3,5 кг пара на 1 м³ природного газа (см. рис. 4). При этом мощность ПГУ достигает 120 МВт.

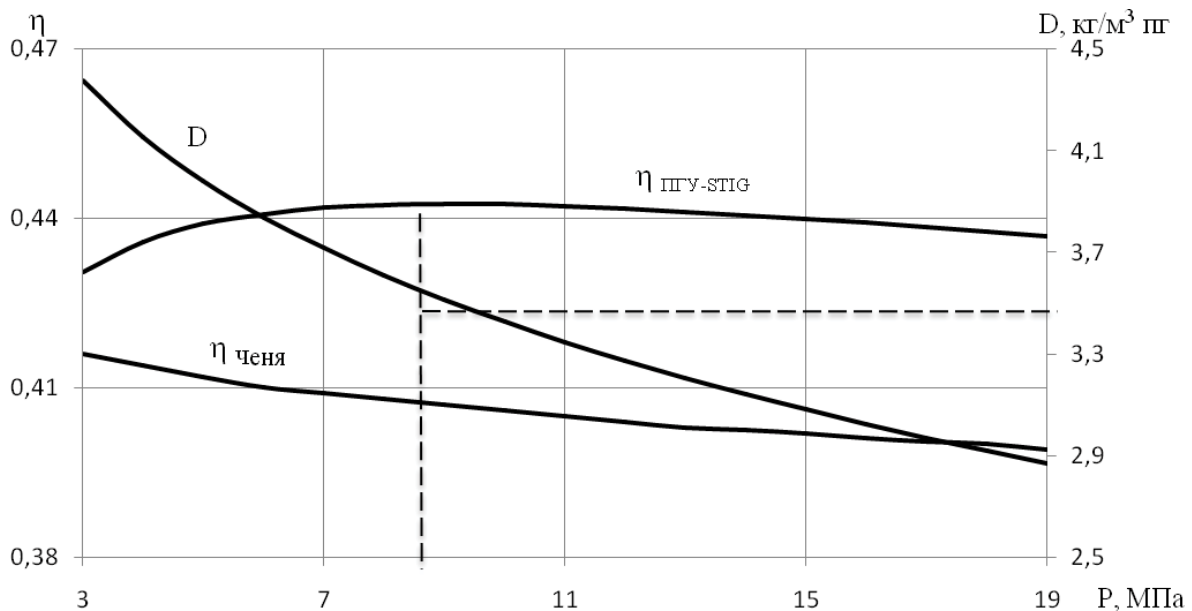


Рис. 4. Электрический КПД, оптимальное давление и оптимальный впрыск пара в ПГУ-STIG с одноконтурным УК

В ПГУ-STIG с котлом двух давлений паровой контур НД работает также на привод паровой турбины. Это увеличивает выработку электроэнергии и повышает КПД до 47 % (см. рис. 5). Оптимальные параметры пара ВД/НД для данной установки составили 20/0,3 МПа и 540/300 °С, при которых мощность ПГУ достигает 128 МВт.

Последней из рассмотренных схем была ПГУ с приводом компрессора от паровой турбины, работающей на паре УК одного и двух давлений. Основные преимущества такой схемы сводятся к следующему: мощность газовой турбины полностью используется для привода электрогенератора; блок «паровая турбина-компрессор» может быть выполнен быстроходным с существенным снижением его массы и габаритов.

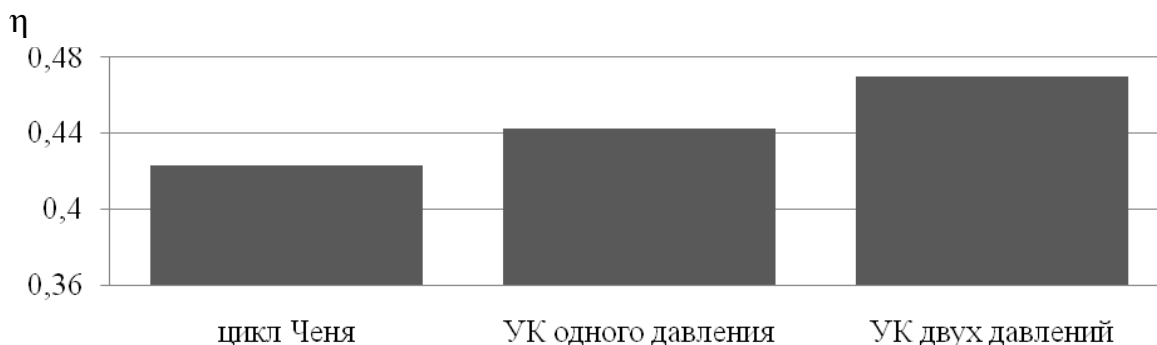


Рис. 5. КПД по выработке электроэнергии ПГУ-STIG

Расчеты показали, что мощности паровой турбины недостаточно для привода компрессора с прежней степенью повышения давления воздуха, т.е. как в исходной ГТУ. Поэтому подбирались различные значения этой степени при различных давлениях пара УК исходя из баланса мощностей компрессора и паровой турбины. Оптимальное давление пара составило около 9 МПа при допустимой влажности пара 13 % в конце процесса расширения пара в турбине (степень сухости $x = 0,87$ – см. рис. 6). При данном давлении и температуре пара 540 °С мощность ПГУ составляет 110 МВт, а ее электрический КПД 49 % (см. рис. 6).

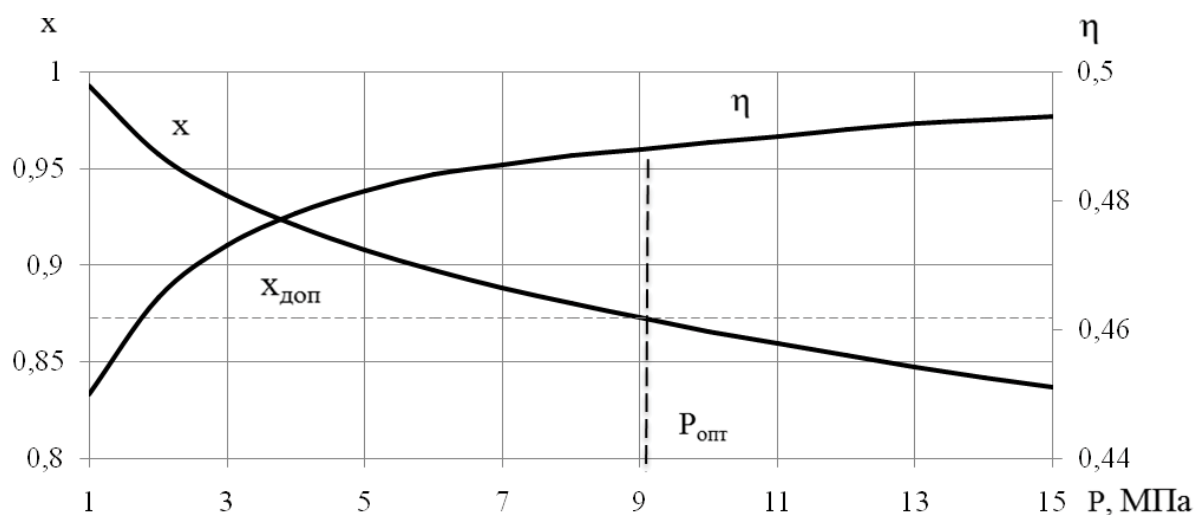


Рис. 6. Влияние давления пара на КПД ПГУ с паровым приводом компрессора

Для варианта с двухконтурным УК при прежней мощности ПГУ оптимальные параметры пара ВД/НД составили 11/0,15 МПа и 540/140 °С, а электрический КПД составил 50 %.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для рассмотренных ПГУ на базе газотурбинного двигателя ГТУ-110 определены оптимальные параметры пара УК одного и двух давлений.
2. Наибольший КПД по выработке электроэнергии из всех исследованных вариантов имеет бинарная ПГУ с двухконтурным УК и последовательным расположением его трубных



элементов высокого и низкого давления. КПД достигает 52,6 %, что превышает эффективность исходной установки ГТУ-110 на 46 % относительных.

3. Комбинированные установки с приводом компрессора от паровой турбины и с впрыском пара в газовый тракт ГТУ уступают бинарным ПГУ по эффективности выработки электроэнергии на 3 – 6 %. Однако у таких установок имеются другие важные преимущества, в частности, у ПГУ-STIG есть возможность форсировки по мощности на 50 – 70 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парогазовые установки с паротурбинным приводом компрессора / А. Е. Зарянкин, С. В. Арианов, В. А. Зарянкин, С. К. Сторожук // Газотурбинные технологии. – 2007. – № 7(58). – С. 18-24.
2. Мордасова, М. В. Оптимизация степени повышения давления воздуха в газотурбиной и парогазовой установках / М. В. Мордасова, Г. Д. Седельников // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 7. – С. 160-162.
3. Морозенко, М. И. Исследование эффективности контактной когенерационной ГТУ / М. И. Морозенко, А. В. Землянский, В. Г. Григорьев // Газотурбинные комбинированные установки и двигатели: материалы XII Всерос. межвузовской науч.-технической конф. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – С. 32-34.
4. Нечитайло, Т. П. Угольный бинарный паротурбинный энергоблок для северных регионов / Т. П. Нечитайло, С. А. Скоморовский // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № III-1(4). – С. 38-42.
5. Цанев, С. В. Расчет на ЭВМ тепловых схем газотурбинных установок в составе парогазовых установок тепловых электростанций / С. В. Цанев, И. М. Чухин. – М.: МЭИ, 1986. – 40 с.

Ющенко Л. В.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ ВНУТРИ СОЛЕНОИДОВ

Ющенко Л. В.

L.V. Yushchenko

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ ВНУТРИ СОЛЕНОИДОВ

FERROMAGNETIC BODY'S MOVEMENT INSIDE SOLENOID COILS

Ющенко Леонид Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47; 8(4212)40-75-16. E-mail: vlas@festu.khv.ru
Mr. Leonid V. Yshenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electrotechnical Engineering, Electronics and Electromechanical Engineering, the Far Eastern State Transport University, Russia, 680021, city of Khabarovsk, 47 Serysheva Str., phone: + 7 (4212) 407516. E-mail: vlas@festu.khv.ru.

Аннотация. Рассматриваются теоретические основы перемещения магнитного поля внутри неподвижных объектов, например внутри цилиндрической поверхности. Принимается цилиндрическая поверхность в виде диэлектрической втулки. С внешней стороны на втулке размещаются три (или кратное трем) обмотки, к которым подводится трехфазное напряжение через полупроводниковые диоды. Обмотки по очереди создают внутри втулки магнитное поле со сдвигом во времени и в пространстве. Магнитное поле сцепляется с ферромагнитным телом определенных размеров, помещенным внутри втулки, и перемещает его.

Summary. The paper suggest a theoretical framework for the movement of a magnetic field inside static objects, e.g. inside a diametrical surface. A diametrical surface in the form of a dielectric bush is taken. Three-phase voltage is applied to three (or multiple of three) windings placed on the outer side of the bush through semiconductor diodes. The windings in turn create a magnetic field inside the bush with a shift in time and space. The magnetic field couples with a ferromagnetic body of a certain size placed inside the bush and moves it.

Ключевые слова: трехфазное напряжение, полупроводниковые диоды, диэлектрическая втулка, обмотки, концентрическое магнитное поле, перемещение ферромагнитного тела.

Key words: three-phase voltage, semiconductor diodes, dielectric bush, windings, concentric magnetic field, movement of a ferromagnetic body.

УДК 621.313.333.001.24

Как только человеку стало известно явление, связанное с действием магнитных сил, а именно магнитные силы могут притягивать или отталкивать ферромагнитные тела, так стали появляться способы и устройства для перемещения этих тел.

Например, немецкий ученый Карл Гаусс заложил основы математической теории электромагнетизма, предложил устройство, состоящее из соленоида, внутри которого находится ствол (как правило из диэлектрика). В один из концов ствола вставляется снаряд, сделанный из ферромагнитного материала. При протекании электрического тока в соленоиде возникает магнитное поле, которое разгоняет этот снаряд, втягивая его во внутрь соленоида. На концах снаряда при этом образуются полюса, симметричные полюсам катушки, из-за чего после прохода центра соленоида снаряд притягивается в обратном направлении, т.е. тормозится.

Для наибольшего эффекта импульс тока в соленоиде должен быть кратковременным и мощным. Как правило, для получения такого импульса используются электрические конденсаторы с высоким рабочим напряжением.

Из приведенного выше вытекает, что устройство в большой степени предназначалось в качестве оружия, поэтому и называлось это устройство «Пушка Гаусса». Из-за низкого

КПД установки и большого расхода электроэнергии, а также большого веса и габаритов эта установка не нашла широкого применения, тем более в промышленности.

При дальнейшем развитии теории электромагнетизма перемещение ферромагнитных тел стало осуществляться не магнитным воздействием, а электромагнитным преобразованием электрической энергии в механическое перемещение [1].

Примером может служить линейный асинхронный двигатель (ЛАД). ЛАД получается из обыкновенного трехфазного асинхронного двигателя вращательного движения, который показан на рис. 1, а. Если мысленно разрезать вдоль по образующей статор и ротор и развернуть их в плоскость, то мы получим ЛАД (см. рис. 1, б), в котором вращающийся ротор становится бегуном.

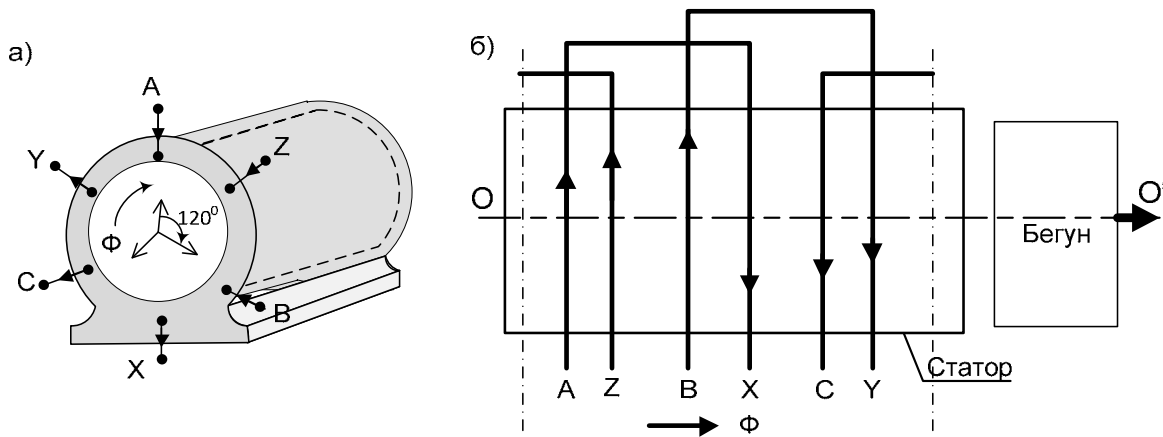


Рис. 1. Асинхронный двигатель:

а – с вращающимся магнитным полем; б – ЛАД с бегущим магнитным полем

Если плоский линейный двигатель мысленно свернуть в трубу вокруг оси, параллельной направлению движения бегущего магнитного поля, т.е. вокруг оси $O-O'$, которая показана на рис. 1, б, то получится цилиндрический линейный асинхронный двигатель (ЦЛАД) с аксиальным магнитным полем. Недостатком такого ЦЛАД является сложность установки цилиндрических катушек в пазы.

Рассматривается следующий простейший способ получения перемещающегося магнитного поля внутри цилиндрической поверхности.

На полу трубку из диэлектрического материала наматываются в одном направлении как минимум три катушки (соленоиды) или число катушек кратное трем. Катушки по бокам ограничены ферромагнитными (стальными) кольцами, которые в то же время являются частью магнитопровода, охватывающего намотанную катушку. Кольца обтягиваются цилиндрическим ферромагнитным (стальным) кожухом. К катушкам, через полупроводниковые диоды, подводится трехфазное напряжение по однополупериодной схеме выпрямления с нулевой точкой, как это показано на рис. 2, а.

В результате через катушки протекает только положительные полуволны переменного тока со сдвигом по фазе в 120° электрических градусов, что можно проследить по рис. 2, б.

Внутри цилиндра получается сконцентрированное перемещающееся магнитное поле. И если во внутрь поместить ферромагнитное тело определенной формы и размеров, то это тело будет перемещаться за движением магнитного поля. Катушки для перемещения магнитного поля можно включить и в плечи трехфазной мостовой схемы выпрямления, как показано на рис. 3, а.

Чтобы знать через какой диод и в какой момент времени будет протекать ток, нужно воспользоваться волновой диаграммой, которая приведена на рис. 3, б.

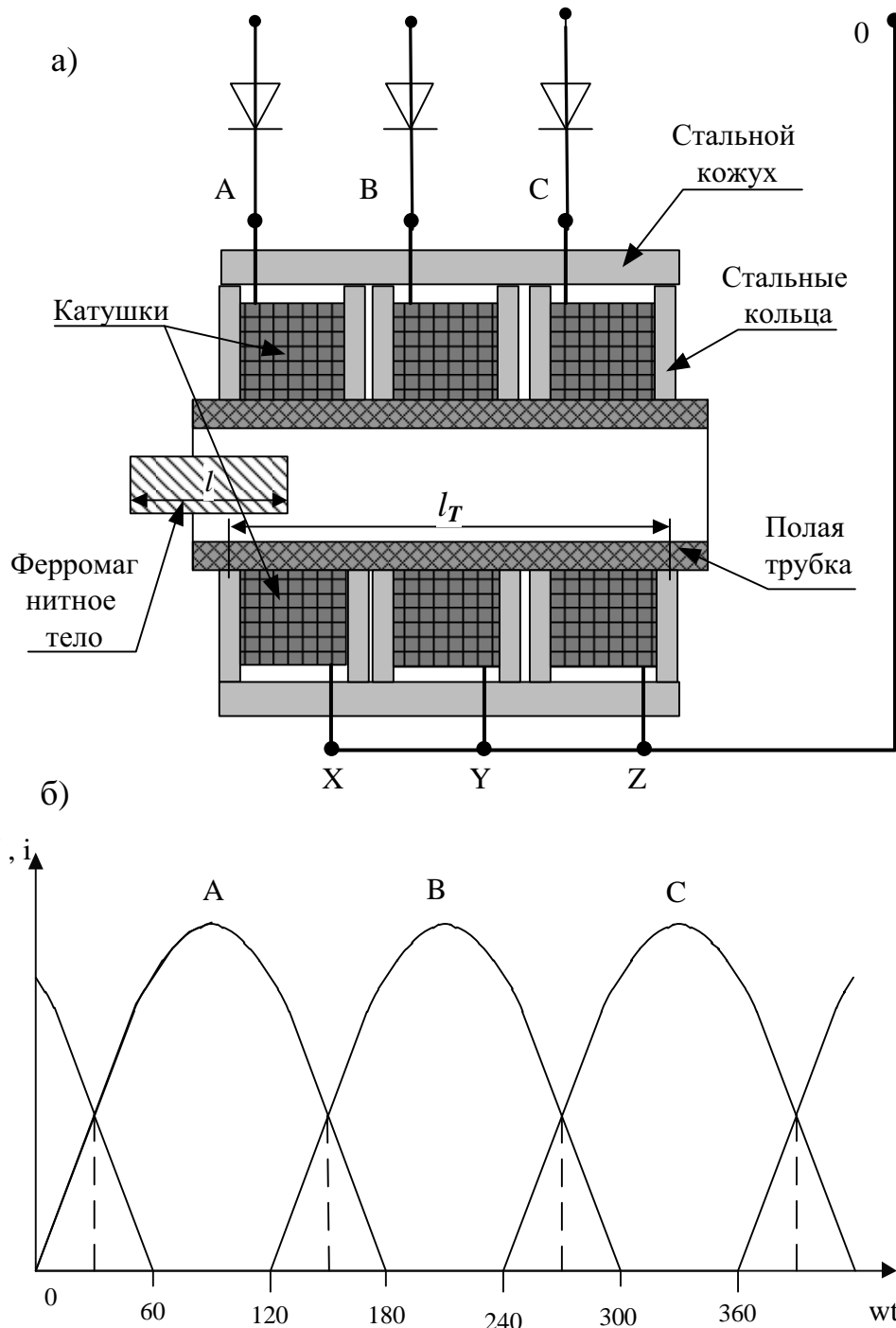
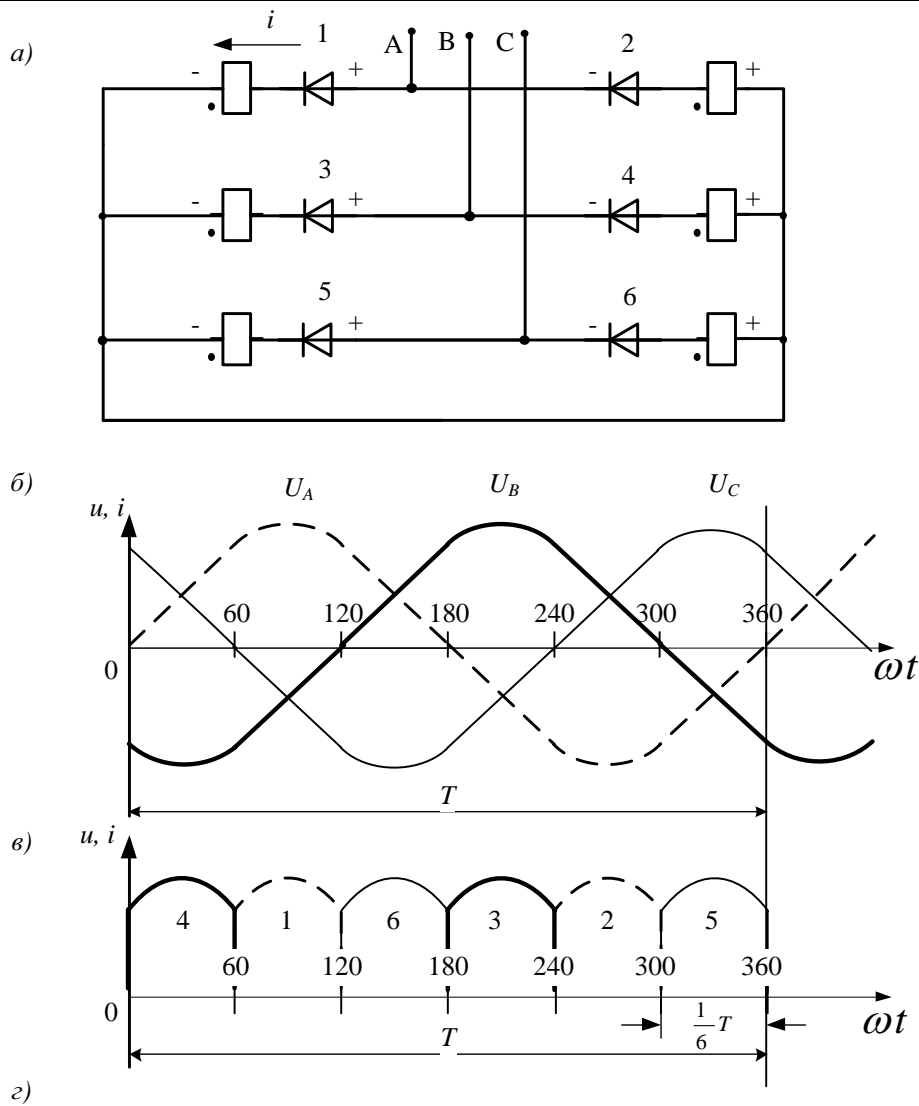


Рис. 2. Способ перемещения магнитного поля:
 а – схема расположения и подключения катушек;
 б – напряжение, подключаемое к катушкам

Так, в период от 0° до 60° максимальный ток протекает в отрицательном плече фазы В, т.е. через диод и катушку под номером 4. А в период от 60° до 120° максимальный ток положительной полуволны в фазе А, т.е. через вентиль и катушку № 1. Порядок протекания максимальных токов показан на рис. 3, в и рис. 3, г.

При порядке чередования фаз А, В, С и перемещения ферромагнитного тела слева направо катушки должны располагаться в порядке, как показано на рис. 4, при подключении их в плечи трехфазного мостового выпрямителя.



г)

№ диодов	периоды работы диодов					
	0-60	60-120	120-180	180-240	240-300	300-360
1		▨	—			
2					▨	—
3			▨	—		
4	▨	—				▨
5	▨				▨	—
6		▨	—			

Рис. 3. К определению порядка выключения катушек:

а – мостовая трехфазная схема выпрямления с катушками в плечах выпрямителя;
 б – волновая диаграмма трехфазных напряжений; в – периоды максимального напряжения через катушки; г – периоды работы диодов; ▨ – при максимальном протекании тока; — – при минимальном протекании тока

На цилиндре, где происходит движение ферромагнитного тела, может быть установлено еще шесть одноименных катушек, включенных последовательно или параллельно, питающихся через один диод.

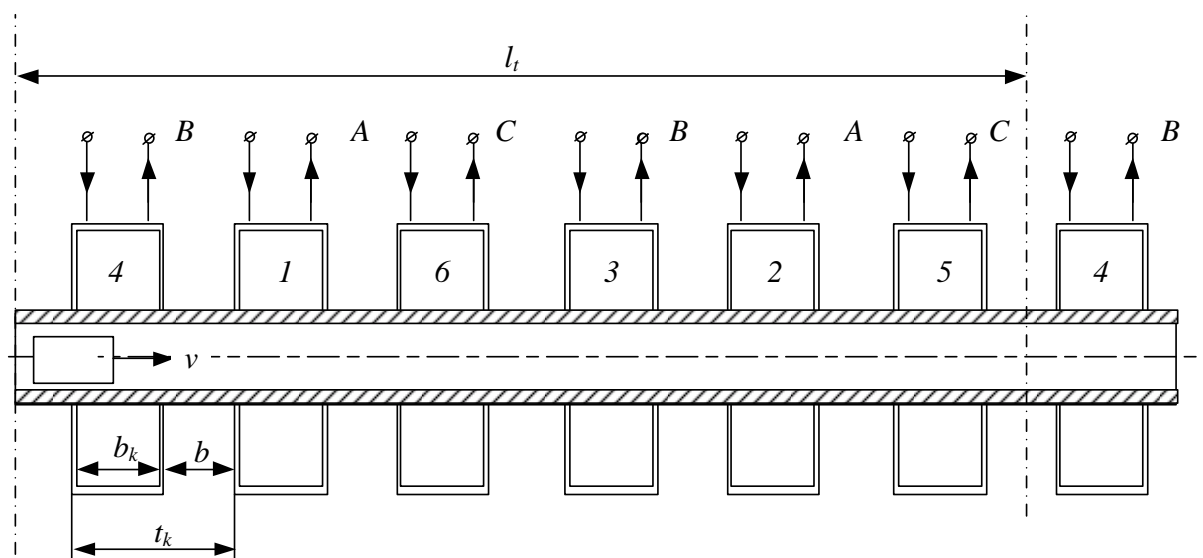


Рис. 4. Порядок расположения катушек на диэлектрическом цилиндре при включении их в плечи мостового выпрямителя

На кафедре электротехники, электроники и электромеханики Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС) было изготовлено устройство для перемещения магнитного поля внутри цилиндрической поверхности по принципу, описанному выше. Экспериментальные исследования показали, что ферромагнитное тело может перемещаться за магнитным полем, имея определенную длину (см. рис. 2).

Если длина перемещающегося тела больше расстояния l_T – расстояния, которое занимают катушки b , по которым протекают токи одного периода T , то движение прекращается, т.к. концевые части тела попадают под притяжение равнозначного магнитного потока. И если передняя часть длинного тела стремится за движущимся полем, то на заднюю часть тела одноименная катушка оказывает тормозящее действие.

Хорошие показатели скорости движения показали тела, длиной соизмеримые с шагом катушки t_k или с шириной катушки b_k (см. рис. 4).

При плотном расположении катушек, когда размер $b = 0$, как это имеет место на рис. 2, a , магнитное поле замыкается не только по своему магнитопроводу, но распространяется на магнитопроводы соседних обесточенных катушек. И тело, если оно длинное, находится в зоне действия магнитного поля по всей своей длине – перемещение замедляется.

Необходимо катушки рассредотачивать на поверхности цилиндра, и каждая катушка должна иметь свою внешнюю часть магнитопровода. Для механической прочности устройства стальной кожух целесообразно заменить на диэлектрический.

Линейная скорость перемещения магнитного поля может быть определена по выражению

$$v = \frac{N \cdot t_k}{T} = N \cdot t_k \cdot f, \quad (1)$$

где N – количество катушек в ряду установки, через которые протекают токи в течение одного периода T ; $N = 3$ – для трехфазной однополупериодной схемы выпрямления с нулевым проводом; $N = 6$ – для трехфазной мостовой схемы выпрямления; t_k – шаг катушек, м (см. рис. 4); f – частота переменного тока.

Как следует из (1) линейная скорость перемещения магнитного поля зависит прямо пропорционально от величины t_k и частоты f .

Так как t_k включает в себя ширину катушки b_k и расстояние между катушками b , то выражение (1) примет вид

$$v = N \cdot (b_k + b) \cdot f.$$

Принимая расстояние b в величинах b_k , т.е. $b = n \cdot b_k$, тогда

$$v = N \cdot (b_k + n \cdot b_k) \cdot f.$$

В экспериментальной установке ширина катушек составила $b_k = 10 \cdot 10^{-3}$ м. Например, для установки, работающей по схеме трехфазного однополупериодного выпрямителя (см. рис. 2, а) и при условии $n = 1$, $t_k = b_k + 1 \cdot b_k = 2b_k$, $f = 50$ Гц, линейная скорость поля равна

$$V = N \cdot 2b_k \cdot f = 3 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 3 \text{ м/с}.$$

Для других значений t_k данные перемещения магнитного поля приведены в табл. 1. Там же приведены результаты расчета при $N = 6$, для разных частот: $f = 50$ Гц, $f = 400$ Гц.

Таблица 1

Зависимость линейной скорости перемещения

N	f , Гц	n	V , м/с
3	50	1	3
		2	4,5
		3	6
	400	1	24
		2	36
		3	48
6	50	1	6
		2	9
		3	12
	400	1	48
		2	72
		3	96

Целесообразность технической реализации способа подтверждает рассмотрение его применительно к упрочнению поверхностным пластическим деформированием (ППД). Одним из наиболее эффективных и распространенных методов ППД является обработка дробью (ОД). Так как для упрочнения стальных деталей используют чугунную или стальную дробь, то дробь, как ферромагнитное тело, можно перемещать описанным выше способом. У традиционной дробеструйной установки большое число последовательно соединенных элементов, что противоречит наиболее развиваемой тенденции в технике – сокращению промежуточных элементов от двигателя к рабочему органу. Магнитный способ перемещения ферромагнитных тел позволяет исключить лишние механические преобразования энергии и повысить энергоэффективность всей системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов, А. Н. Моделирование внешнего магнитного поля трехфазной электрической машины / А. Н. Степанов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № III-1(7). – С. 13-20.

Ханов В. А., Марьин Б. Н., Фролов Д. Н.
V. A. Khanov, B. N. Maryin, D. N. Frolov

**ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ
ОБ ИЗДЕЛИИ (PDM) В НАУКОЁМКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

**DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A PRODUCT DATA MANAGEMENT
SYSTEM (PDM) IN A KNOWLEDGE-INTENSIVE PRODUCTION ENVIRONMENT**

Ханов Владимир Андреевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела информационных технологий, ОАО «Амурский судостроительный завод» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681000, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Аллея Труда, 1. E-mail: vladimir.khanov@gmail.com.

Mr. Vladimir A. Khanov – PhD in Engineering, Deputy Head of the Information Technology Department, ОАО “Amurskiy sudostroitelnyy zavod” (OJSC Amur Shipbuilding Plant), Russia, 681000, Komsomolsk-on-Amur, 1 Truda parkway. E-mail: vladimir.khanov@gmail.com

Марьин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: maryinsb@mail.ru.

Mr. Boris N. Maryin – Doctor of Engineering, Professor, Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Ave. E-mail: maryinsb@mail.ru

Фролов Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: frolov.dnn@mail.ru.

Mr. Dmitriy N. Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Ave. E-mail: frolov.dnn@mail.ru

Аннотация. Описан опыт и приведены результаты разработки и внедрения системы управления данными об изделии в наукоёмком производстве. Определены дальнейшие пути развития автоматизированных систем поддержки принятия решений в соответствии с концептуальной моделью CALS.

Summary. The paper describes the process and results of developing and deploying a product data management system (PDM) in a knowledge-intensive production environment. Possible further development direction for automated decision support systems are defined, in keeping with the CALS concept.

Ключевые слова: автоматизация, наукоёмкое производство, судостроение, информационная поддержка, управление, принятие решений, централизация, техническая подготовка производства, жизненный цикл.

Key words: automation, knowledge-intensive production, shipbuilding, information support, management, decision making, centralization, production design engineering, lifecycle.

УДК 658.5

В настоящее время не вызывает сомнения факт необходимости применения информационных технологий (ИТ) при организации современного наукоёмкого производства, как-то: авиастроение, судостроение и др. Получение максимальных конкурентных преимуществ предприятиями на рынке продукции машиностроительных отраслей промышленности напрямую зависит от эффективного применения современных CALS-технологий (Continuous Acquisition and Lifecycle Support) или системы информационной поддержки процессов жиз-



ненного цикла изделий (ИПИ). В 80-е гг. XX в. понимание этого факта и уровень развития ИТ создали условия для развития ИПИ-систем в промышленности [6].

Необходимость повышения производительности труда и качества выпускаемой продукции вместе с сокращением сроков запуска в производство новых изделий толкнула предприятия наукоёмкого производства к развитию и обширному внедрению ИТ. Появилось понятие компьютеризированного интегрированного производства, суть которого заключалась не только в применении ИТ для автоматизации технологических процессов и операций, но и в создании интегрированной информационной системы (ИС), построенной на использовании общих баз данных в процессах технической подготовки и управления производством [3].

В 1989 г. на Амурском судостроительном заводе (АСЗ) была внедрена ИС собственной разработки «Автоматизированная система технологической подготовки производства» (АСТПП), основное назначение которой состояло в автоматизации выпуска бумажной технологической документации – планово-материальной документации (ПМД), которая включает технические наряды, комплектовочные и материальные ведомости для проведения корпусных работ (изделия верфи), а также технические наряды, маршрутно-комплектовочные графики, материальные ведомости и сводные графики для изготовления изделий машиностроительной части. Аппаратной платформой для системы служила терминальная сеть на базе мейнфрейма, которая охватывала конструкторский отдел, технологический отдел, основные производственные цеха и отдел автоматизированных систем управления предприятием, что позволяло осуществлять коллективную разработку документов, обеспечивая управление версиями и конфигурацией изделий, потоками работ и т.д. В качестве единого хранилища данных применялась единая СУБД, специализированная для эксплуатации на мейнфреймовых системах, что позволило осуществлять длительное хранение и обработку информации по проектам, а также вести всевозможные классификаторы и номенклатурные справочники материалов и оборудования.

В процессе эксплуатации АСТПП и других неинтегрированных автоматизированных систем выяснилось, что ориентированные на автоматизацию изготовления традиционных бумажных документов системы не решают проблем информационного обмена между различными участниками жизненного цикла (ЖЦ) изделия: заказчиками, проектантами, производителями, эксплуатантами и т.д. Бумажная документация и способы представления информации в ней ограничивают возможности использования современных ИТ. По мере увеличения степени сложности изделия, в частности военной техники, резко увеличивается объём технической документации – десятки тысяч листов, а по некоторым изделиям (например, судостроительная продукция) – тонны документации. Использование бумажной документации вызывает значительные сложности, связанные с осуществлением поиска информации, внесением изменений в конструкцию и технологию. Возникает множество ошибок, на устранение которых затрачивается много ресурсов. В результате достижение эффективности всех видов деятельности, связанной с проектированием, производством и эксплуатацией сложных наукоёмких изделий, становится невозможным.

Необходимо отметить, что современное судно представляет собой крупный инженерный комплекс, включающий сложные энергетические установки, специальные устройства, автоматизированные судовые системы. Характерная особенность производства основной продукции судостроительных заводов – это длительный цикл постройки судна, широкая номенклатура изготавливаемых деталей и узлов при их мелкосерийности. Изготовление крупногабаритных деталей корпуса судна требует значительного объема работ при сборке. Для судостроительных цехов типичны большая стоимость и трудоемкость изготовления деталей и сборки узлов, высокий, по сравнению с другими отраслями, объем физического труда, сложность его комплексной механизации и автоматизации из-за необходимости выполнения значительного объема работ в секциях, блоках и отдельных помещениях судна. Таким образом, одним из главных условий эффективной работы предприятия становится правильная организация производственного процесса.

Так как АСТПП не смогла в полной мере претендовать на статус PDM-системы (Product Data Management) ввиду ограниченного набора возможностей и функционального назначения, было принято решение о расширении её возможностей с автоматизацией как можно большего количества бизнес-процессов.

В 2005 г. на АСЗ начался процесс комплексной информатизации, в результате чего начала развиваться информационно-вычислительная сеть предприятия, которая явилась фундаментом для создания единого информационного пространства (ЕИП) или интегрированной информационной среды (ИИС), которая, в свою очередь, является ядром ИПИ.

На базе созданной ИИС была разработана фактически с нуля система, в основу которой была заложена схема информационных потоков, реализованная в АСТПП. Таким образом, АСТПП эволюционировала и получила название Автоматизированная система технической подготовки производства (АСТПП), что, на наш взгляд, отразило её суть.

Новая система реализована и функционирует в виде бизнес-приложения, интегрированного на единой инструментальной платформе «Корпоративная информационная система» (КИС), использующей клиент-серверную технологию и представляющей собой ИИС. Данное решение открыло возможность беспрепятственной масштабируемости, а именно вовлечения большего количества участников в ИИС, ограниченного лишь возможностями физической сетевой инфраструктуры.

В общем виде процесс технической подготовки производства, реализованный в АСТПП (см. рис. 1), состоит из процессов конструкторской и технологической подготовки, а также процесса материально-технического снабжения.

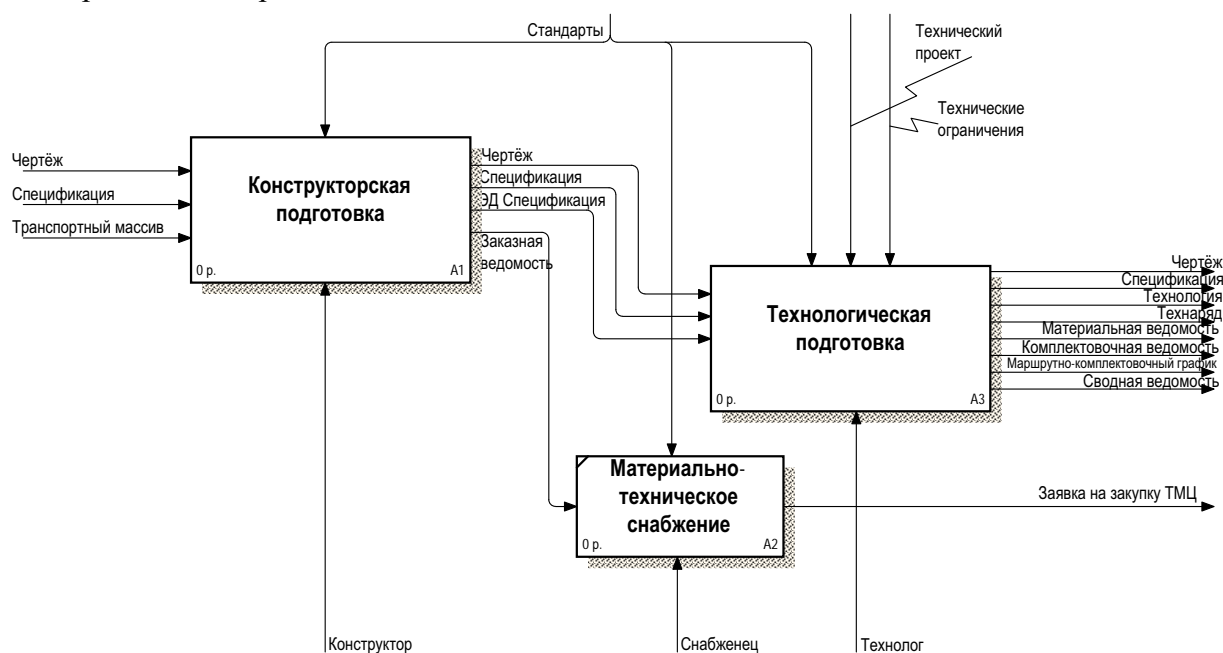


Рис. 1. Процесс технической подготовки производства, реализованный в АСТПП:
ТМЦ – товарно-материальные ценности

На предприятие вместе с рабочей конструкторской документацией (РКД) поступают транспортные массивы (ТМ) – массивы данных, представляющие собой спецификации к чертежам в электронном виде. На этапе конструкторской подготовки (см. рис. 2) прорабатывается РКД и проводится проверка корректности структуры данных ТМ, после которой ТМ импортируется в базу данных (БД) АСТПП, в случае обнаружения структурных ошибок ТМ отправляется на корректировку. Из полученных ТМ в автоматизированном режиме формируются спецификации к чертежам в электронном виде, а также заказная ведомость для орга-

низации материально-технического снабжения для формирования в автоматизированном режиме заявок на закупку товарно-материальных ценностей (ТМЦ).

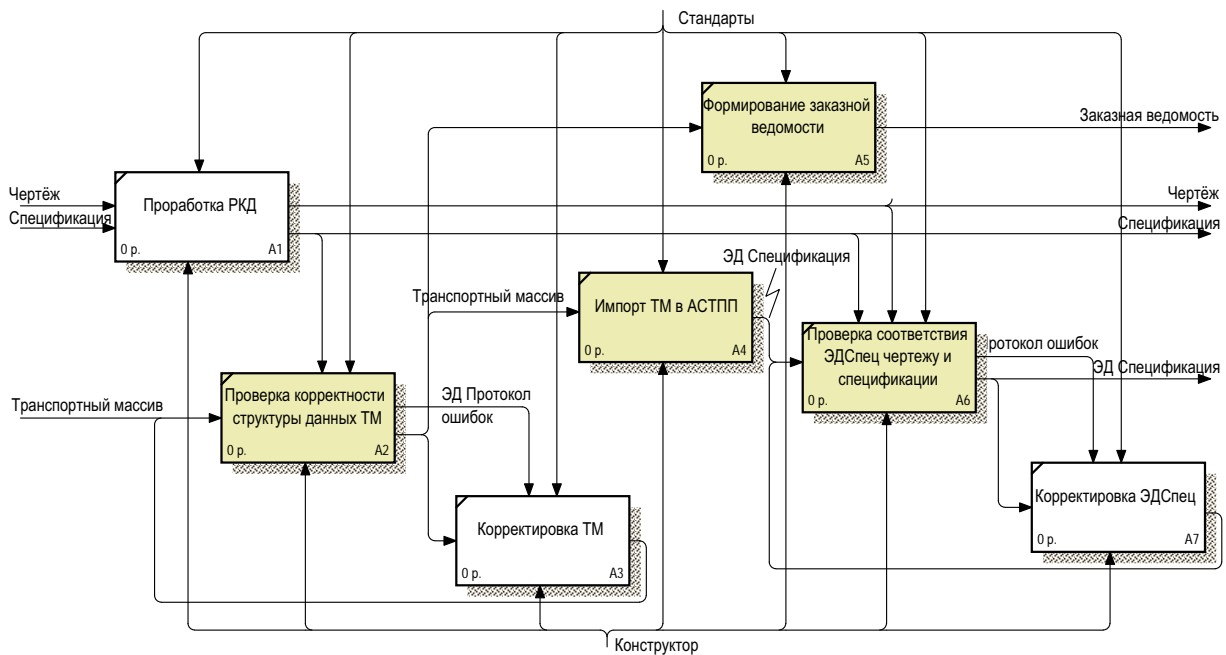


Рис. 2. Этап «Конструкторская подготовка», реализованный в АСТПП:
ЭД – электронный документ; ЭДСпец – спецификация в электронном виде

Сформированные в электронном виде спецификации проверяются на соответствие РКД, в случае обнаружения ошибок корректируются и направляются для технологической проработки (см. рис. 3).

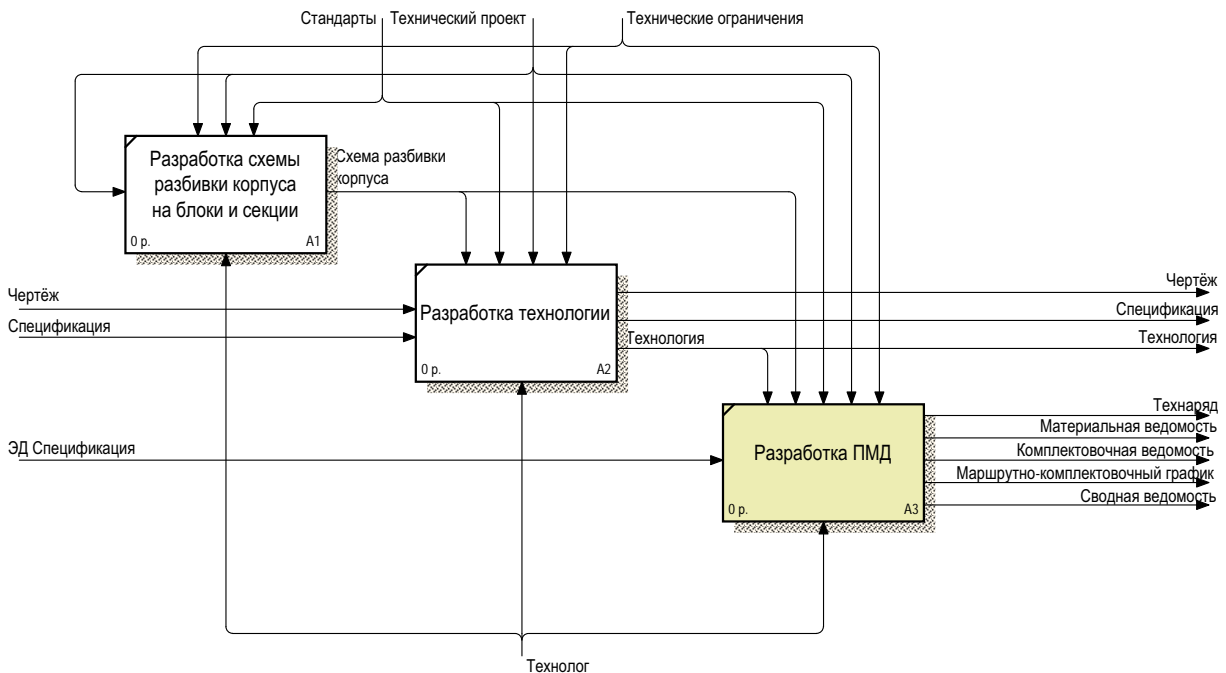


Рис. 3. Этап «Технологическая подготовка», реализованный в АСТПП:
ПМД – планово-материальная документация

В процессе автоматизированной технологической подготовки производства в АСТПП на основе электронных спецификаций в соответствии с руководящими документами технологами производится разработка и выпуск планово-материальной документации (ПМД) для производственных цехов, которая включает в себя технологический наряд, материальную и комплектовочную ведомости, маршрутно-комплектвочный график, сводную ведомость. Таким образом, полностью решена задача обеспечения производственных цехов планово-материальной документацией.

Реализованная система объединяет все данные о структуре и составе изделия и является системообразующей, поскольку снабжает информацией все этапы жизненного цикла (ЖЦ), следующие за этапом проектирования. Целью управления данными об изделиях является обеспечение полноты, целостности и актуальности информации об изделии в любой момент времени и доступность ее всем участникам ЖЦ в соответствии с имеющимися у них правами [4].

База данных системы управления данными об изделиях АСТПП служит ядром ИИС, обеспечивая хранение [8]:

- данных о проектах, идентификационных и классификационных данных об изделии и его компонентах;
- структуры и состава изделия;
- версии и вариантов состава и структуры;
- геометрических моделей, чертежей и других документов в различных форматах;
- характеристики изделия и его компонентов;
- данных о материалах, стандартных деталях и комплектующих изделиях;
- данных о технологии изготовления изделия и его компонентов, об оснастке, инструменте и т.д.

Реализованная система управления данными об изделии позволяет регламентировать хранение этих данных, вносить в них необходимые изменения, предоставлять через стандартизованные интерфейсы данные как приложениям КИС, так и сторонним приложениям, например, системе «1С:Предприятие» (конфигурация «Управление производственным предприятием»), а также конкретным участникам ЖЦ изделия.

Производственный процесс должен организовываться с соблюдением основных требований: непрерывность, прямоточность, пропорциональность и ритмичность. Требование непрерывности состоит в максимальном сокращении времени перерывов в протекании технологического процесса, а также вспомогательных и обслуживающих процессов. Оно тесно связано с требованием прямоточности, то есть формированием прямолинейного и кратчайшего пути движения каждой детали или сборочной единицы в процессе производства. Пропорциональность означает соблюдение определенной пропорции между основными, вспомогательными и обслуживающими процессами, то есть во время каждого вспомогательного или обслуживающего процесса должен быть своевременно выполнен необходимый комплекс работ, чтобы обеспечить основной процесс необходимыми инструментами, оснасткой, энергией и т.п. Требование ритмичности производственного процесса заключается в регулярном повторении процессов производства в одинаковых или возрастающих количествах продукции через четко определенные периоды времени, что может быть достигнуто только при соблюдении всех названных выше требований [7].

В соответствии с концептуальной моделью CALS – ИПИ [3], с использованием в качестве платформы реализованной в рамках КИС системы управления данными об изделии становится возможным продолжение развития ИПИ-технологий в наукоёмком производстве – разработка системы управления ресурсами предприятия (ERP – Enterprise Resource Planning). За счёт интеграции на единой программно-аппаратной платформе КИС систем PDM и ERP открывается возможность создания PLM-системы (Product Lifecycle Management) – системы управления ЖЦ изделия, позволяющей создать ИИС (ЕИП) для всего ЖЦ изделия, обеспечив актуальность и доступность информации о проекте всем заинтере-



ресованным участникам ЖЦ (лицам, принимающим решения). Это позволит организовать производственный процесс с соблюдением основных требований: непрерывность, прямоточность, пропорциональность и ритмичность.

Таким образом, дальнейшее развитие АСТПП необходимо осуществлять в направлении создания полноценной системы управления ЖЦ изделия (PLM). При этом обязательным условием должно стать наличие функций обратной связи, то есть возможности получать в режиме реального времени информацию о состоянии ЖЦ изделия на всех его этапах – осуществлять мониторинг состояния, что даст возможность корректировать ключевые управляемые технологические параметры производственного этапа ЖЦ на основе объективной информации с целью достижения заданных параметров качества изделия и минимизации производственных издержек, связанных с возникновением брака на различных этапах производственной цепи на предприятиях наукоёмкого машиностроения [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Братухин, А. Г. Информационные технологии в наукоемком машиностроении / А. Г. Братухин [и др.]. – К.: Техника, 2001. – 728 с.
2. Гейтс Б. Бизнес со скоростью мысли / Б. Гейтс. – 2-е изд., испр. – М.: Эксмо, 2006. – 480 с., ил.
3. Информационное обеспечение, поддержка и сопровождение жизненного цикла изделия / В. В. Бакаев, Е. В. Судов, Б. Н. Марьин [и др.]; под ред. В. В. Бакаева. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 624 с., ил.
4. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России / НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика» / Е. В. Судов, А. И. Левин. – М., 2002.
5. Автоматизированный мониторинг технологии производства резинотехнических изделий авиационного назначения / Б. Н. Марьин, С. И. Феоктистов, Д. Н. Фролов, В. А. Ханов // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. – 2009. – № 6. – С. 50-52.
6. Судов, Е. В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели / Е. В. Судов. – М.: ООО Издательский дом «МВМ», 2003. – 264 с.
7. Туровец, О. Г. Организация производства и управление предприятием / О. Г. Туровец. – М.: Инфра-М, 2010. – 512 с.
8. Необходимость централизации управления процессами автоматизации управления в рамках крупной корпорации / В. А. Ханов, Б. Н. Марьин, Д. Н. Фролов, Н. П. Куриная, Р. В. Шпорт // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. «Науки о природе и технике». – 2011. – № III-1(7). – С. 66-70.

Степаненко В. Е., Фролов Д. Н.

**МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
ДИСКРЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ЦВЕТНЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

Степаненко В. Е., Фролов Д. Н.

V. E. Stepanenko, D. N. Frolov

**МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
ДИСКРЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ЦВЕТНЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

**AN AUTOMATED MANAGEMENT MODEL FOR THE PROCESS OF DISCRETE COM-
PONENT MANUFACTURING USING COLOURED PETRI NETS**



Степаненко Виктор Евгеньевич – специалист отдела внедрения и эксплуатации корпоративных систем ОАО «КНААПО» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vices@rambler.ru.

Mr. Victor E. Stepanenko – expert, Department of Customization and Support for Corporate Systems, JSC «KNAAPO». E-mail: vices@rambler.ru



Фролов Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 89098986440. E-mail: frolov.dnn@mail.ru.

Mr. Dmitry N. Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; phone: + 7 9098986440. E-mail: frolov.dnn@mail.ru

Аннотация. В статье приведена обобщенная модель автоматизированного управления процессом дискретного машиностроительного производства. Раскрыты и описаны основные компоненты этой модели: автоматизированная система управления предприятием класса ERP и процесс механообработки в авиастроительном производстве. Приведена реализация модели при помощи цветных сетей Петри на примере процесса производства клапана управления фонарем изделия авиационной техники, изготавливаемой на ОАО «КнААПО».

Summary. The paper provides a generalized model of automated management of the processes of discrete component manufacturing in machine-building. The key components of this model are identified and described, i.e.: an ERP-type factory automated system and machining processes in aircraft building. An example is provided of implementation of the model using colour Petri nets, as demonstrated by the process of manufacture of a lamp control valve of an aircraft produced at JSC «KNAAPO» is resulted.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления предприятием, цветные сети Петри, дискретное производство.

Key words: enterprise automation control systems, coloured Petri nets, discrete component manufacture.

УДК 519.876

Процесс дискретного машиностроительного производства можно разделить на следующие составляющие: транспортировка, обработка; контроль; задержка [1]. То есть, другими словами, дискретное машиностроительное производство есть последовательность действий направленных на изменение местоположения или физических характеристик некоего материального объекта (производственного ресурса) и превращения его в конечный продукт.

Стоит отметить, что изменение физических характеристик объекта происходит по заранее определенному правилу (технологии производства).

Тогда управление подобным процессом сводится к выработке воздействия, содержащего в себе информацию: о типе и количестве ресурса, который должен быть перемещен или обработан и поставлен на определенный буфер, а также сроке (дата и время), к которому требуется ресурс. При этом очень важно учесть состояние самого процесса (объекта управления – ОУ). Формирование подобного управляющего воздействия производится человеком или группой людей (лицом, принимающим решение – ЛПР) при помощи инструментария, заложенного в автоматизированную систему управления предприятием (АСУП). На рис. 1 представлена схема подобного автоматизированного управления. Пунктирной линией обозначены слабоформализуемые информационные потоки, предназначенные для анализа, который осуществляется ЛПР. Сплошной линией обозначаются формализованные информационные потоки, обработка и передача которых осуществляется по средствам информационных систем (ИС).

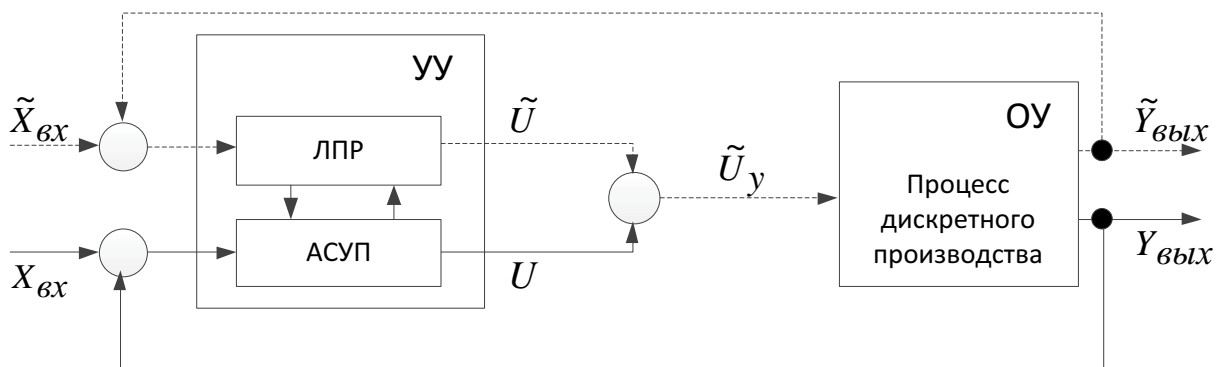


Рис. 1. Обобщенная схема автоматизированного управления производством

На рис. 1 изображены:

$X_{вх}$ – вектор задающих воздействий, выраженных в виде набора четких детерминированных значений, способных обрабатываться при помощи АСУП;

$\tilde{X}_{вх}$ – вектор задающих воздействий, выраженный в виде набора количественных, качественных и ассоциативных характеристик, в большинстве неопределенных и нечетких и не поддающихся обработке АСУП. Решение по управлению принимаются ЛПР.

\tilde{U}_y – вектор управляющих воздействий, $\tilde{U}_y = U \cup \tilde{U}$;

U – вектор заказов на закупку и производство, генерируемых и передаваемых в производство по средствам АСУП;

\tilde{U} – вектор управляющих воздействий, выраженный в виде набора количественных, качественных и ассоциативных характеристик, в большинстве неопределенных и нечетких и не поддающихся обработке АСУП;

$Y_{вх}$ – выходной вектор, содержащий информацию о текущем состоянии объекта управления (ОУ), в виде набора четких детерминированных значений, способных обрабатываться при помощи АСУП;

$\tilde{Y}_{вх}$ – выходной вектор, содержащий информацию о текущем состоянии объекта управления, выраженный в виде набора количественных, качественных и ассоциативных характеристик, в большинстве неопределенных и нечетких и не поддающихся обработке АСУП.

Рассмотрим более подробно структуру блока АСУП (см. рис. 2). Одно из основных назначение данного блока состоит в определении спроса (потребности) на материальные ре

сурсы, а также формирование управляющих воздействий для производства виде заказов на закупку и производство. Под заказом понимается кортеж, состоящий из трех компонент:

i – тип ресурса, который необходимо переместить или изготовить. $i \in I$ множеству всех закупаемых и изготавливаемых изделий на предприятии. Как правило, в АСУП имеется информация о большинстве элементов множества;

q – количество ресурса, которое необходимо переместить или изготовить (действительная величина);

t – срок, к которому необходимо изготовить или переместить ресурс.

Последовательность действий, направленная на формирование вектора $U = U_{жпс} \cup U_{мпс}$, состоит из трех действий.

Действие 1. На основе задающих воздействий, выраженных в виде вектора заказов покупателей $X_{ex} = (x_1^{ex}, x_2^{ex}, \dots, x_n^{ex})$, где $x_i^{ex} = (i, q_i)$, формируется график производства $D_{нс} = (d_1^{нс}, d_2^{нс}, \dots, d_n^{нс})$. Вектор выражает независимый спрос на продукцию предприятия, каждый компонент привязан к конкретному проекту (под проектом понимается набор работ, направленных на реализацию заказа покупателя) и имеет следующую структуру $d_i^{нс} = (i, q_i, t_i, c_i, p_i)$, где c_i – идентификатор проекта; p_i – идентификатор производственной программы.

Действие 2. На основе независимого спроса $D_{нс}$ формируется жестко привязанный спрос $D_{жпс} = (d_1^{жпс}, d_2^{жпс}, \dots, d_n^{жпс})$. Под жесткой привязкой ресурса к проекту понимается его принадлежность к конкретному производственному заказу покупателя (конкретное производственное задание). Жестко привязанный ресурс может быть использован только для выполнения работ, к которым он привязан (например, авиационные двигатели применяются только на определенные типы самолетов). В свою очередь, $d_i^{жпс} = (i, q_i, t_i, c_i, p_i, s_i)$, где s_i – серийный номер конечного изделия (машины).

Действие 3. На основе жестко привязанного спроса $D_{жпс}$ формируется мягко привязанный спрос. Мягкопривязанный ресурс может быть использован в большом количестве технологических процессов для разных продуктовых программ (например, стандартные болты, винты, шайбы). Также его называют анонимным.

Результатом 2-го и 3-го действий являются векторы управляющих воздействий $U^{жпс}$ и $U^{мпс}$. Как и остальные векторы, описанные выше, они состоят из жестко привязанных

$u_i^{жпс} = (i, q_i, t_i, c_i, p_i, s_i)$, мягкопривязанных заказов $u_i^{мпс} = (i, q_i, t_i)$ на закупку и производство ресурса. Характеризуя заказ на закупку или производство, можно сказать, что он несет в себе следующую информацию:

- уникальный идентификатор ресурса;
- тип ресурса (закупаемый или изготавливаемый);

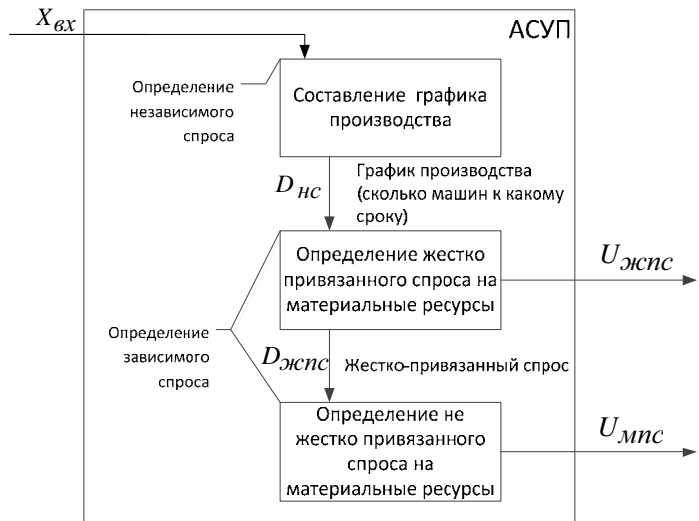


Рис. 2. Структура блока АСУП

- количество ресурса;
- дата потребности ресурса;
- привязка ресурса к производственному процессу.

Теперь рассмотрим структуру самого ОУ, для примера возьмем процесс производства клапана управления фонарем на самолете Су-30 МКК (МК2), изготавливаемого на Комсомольском-на-Амуре авиационном производственном объединении (ОАО «КнААПО»). Для начала опишем место технологического процесса в общем процессе производства. На рис. 3 представлен фрагмент дерева состава изготавливаемого изделия, взятого из корпоративной системы BAAN IV A&D (указанное дерево не является представлением полного конструкторского состава, а лишь отражает иерархию работ, необходимую для планирования производства).

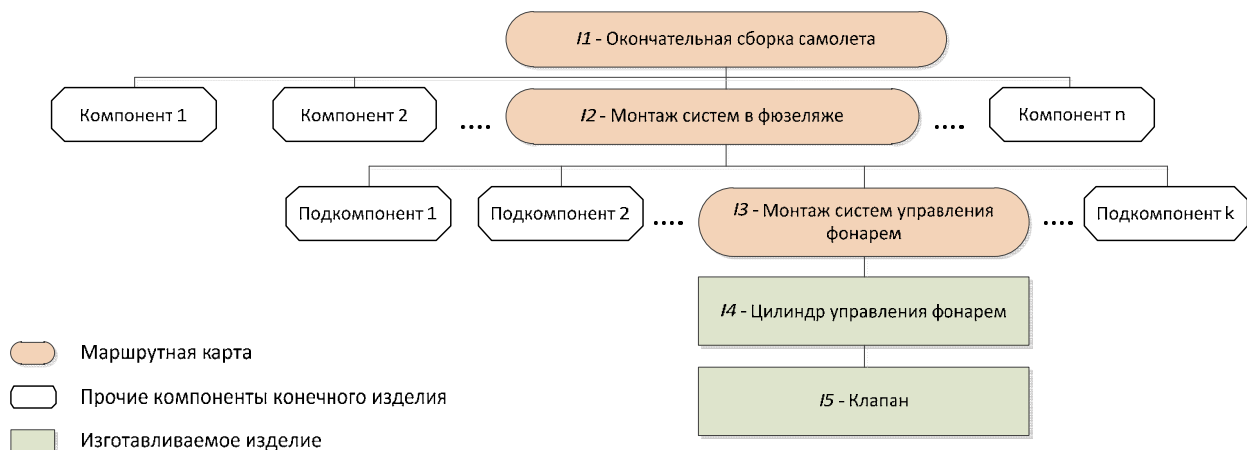


Рис. 3. Фрагмент дерева состава изделия Су-30 МКК (МК2)

На рис. 4 показан состав самого клапана. Из рисунка видно, что изделие изготавливается из 20 компонент (детали, стандартизированные детали, материалы), многие из которых в свою очередь имеют собственную подструктуру. Стоит отметить, что схемы, изображенные на рис. 3 – 4, построены на основе данных корпоративной ERP системы, поэтому структура изделий содержит дополнительные так называемые «фиктивные изделия», созданные для обеспечения корректной работы модуля, определяющего плановую потребность в закупаемом или изготавливаемом ресурсе.

Итак, описаны процесс производства и система, автоматизирующая управление этим процессом. Перейдем к описанию модели, способной формализовать производство и его управление. Для начала рассмотрим структуру модели сети Петри (см. рис. 5). Алгоритм получения такой структуры состоит в следующем. Обходя последовательно каждую из вершин графа состава изделия (см. рис. 4), необходимо:

1 Создать переход $t_i \in T$ сети Петри $i = \overline{1, n}$, где n – количество вершин графа состава изделия, T – множество всех переходов сети Петри. Созданный переход будет моделировать процесс изготовления или закупки (перемещения) закупаемого или изготавливаемого ресурса.

2 Создать (или определить) выходное место $p_i^{\bullet} \in P$ сети Петри $i = \overline{1, n}$, где P – множество всех мест сети Петри. Место моделирует буфер (склад), на который перемещается закупленный или изготовленный ресурс. Наличие маркера в p_i^{\bullet} будет моделировать состояние, когда ресурс изготовлен или перемещен и готов к употреблению в производство на следующей технологической или логистической операции.

3 Создать (или определить) входное место $\bullet p_i \in P$. Место моделирует буфер (склад), из которого необходимо потребить ресурс при срабатывании перехода. Наличие маркера

в $\bullet p_i$ накладывает условие на срабатывание перехода (осуществление производственного процесса).

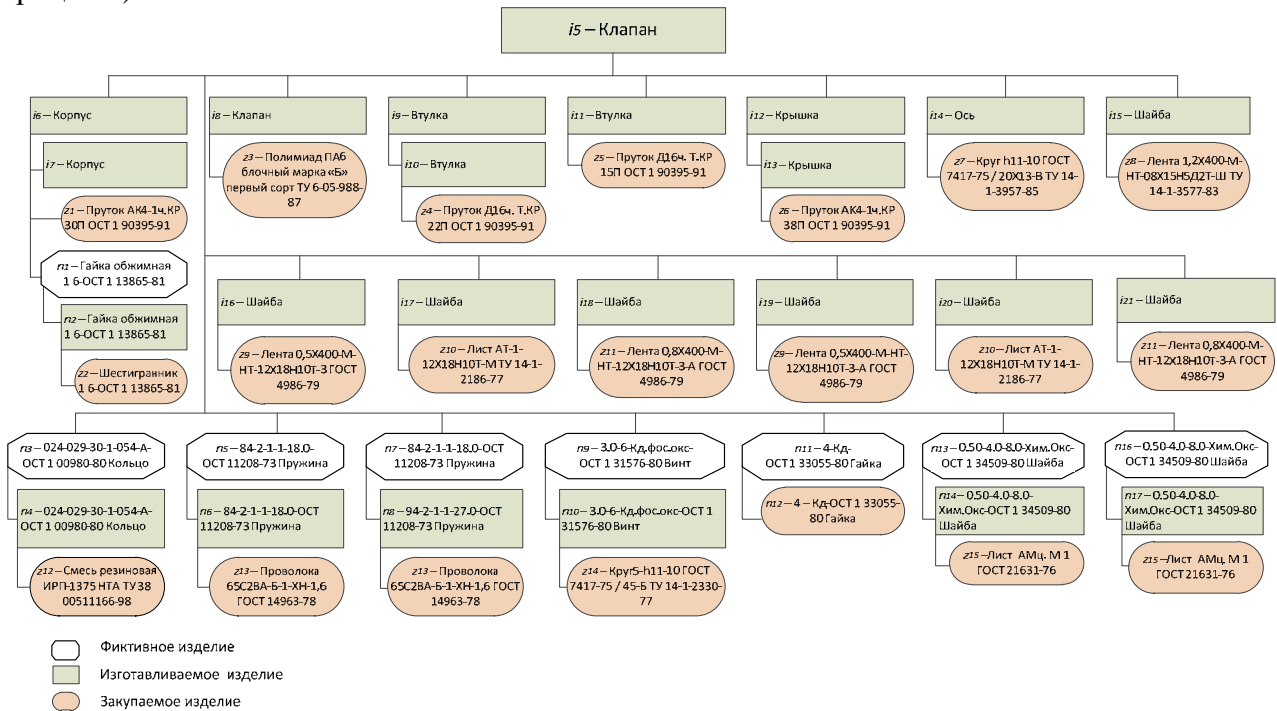


Рис. 4. Состав изготавливаемого изделия

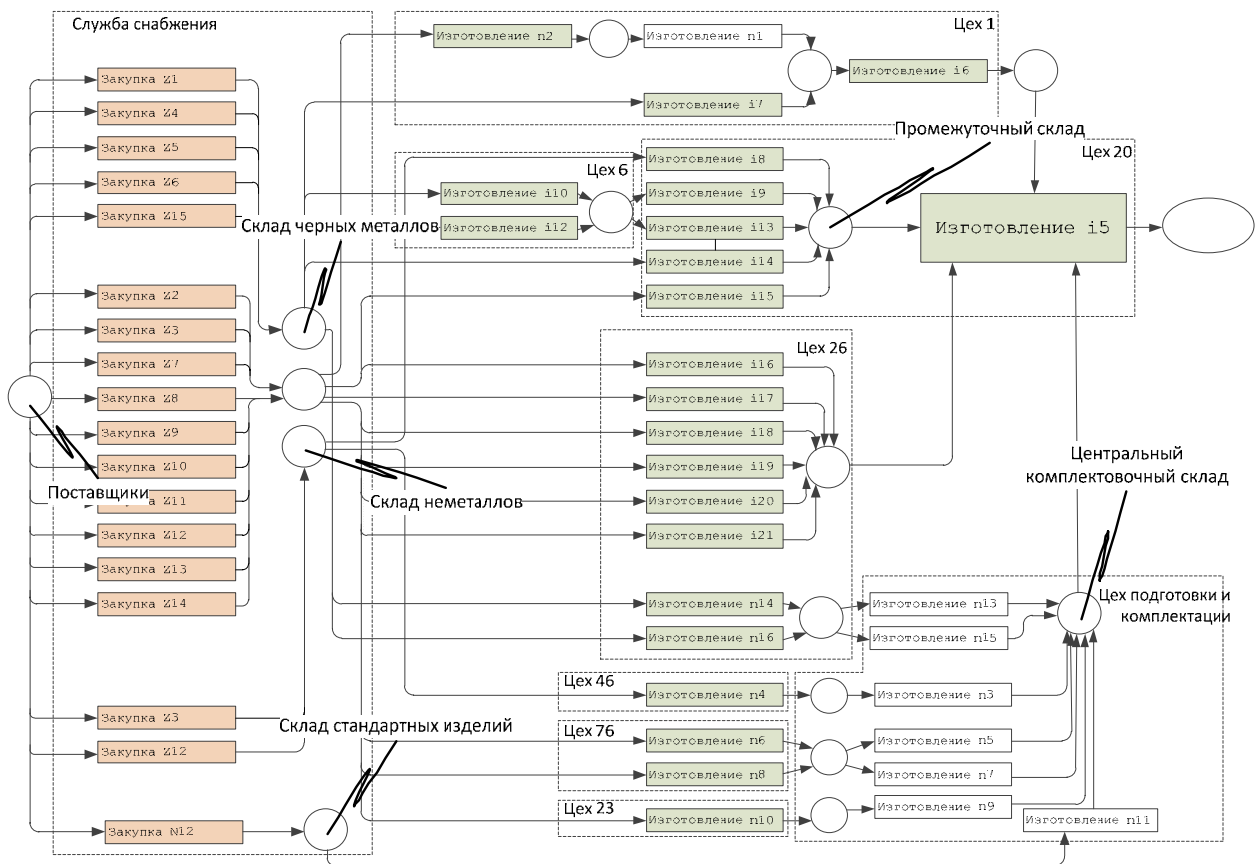


Рис. 5. Модель сети Петри процесса производства клапана управления фонарем



Рис. 6. Фрагмент сети Петри, моделирующий процессы, происходящие в АСУП при формировании управляющих воздействий

Теперь рассмотрим механизмы формирования управляющих воздействий в терминах сети Петри. На рис. 6 изображена структура сети, позволяющая смоделировать функционал АСУП, направленный на формирование управляющих воздействий. Позиции сети: p_1 – заказ от покупателя принят; p_2 – график производства сформирован; p_3 – жестко привязанный спрос на материальные ресурсы сформирован; p_4 – заказы на закупку и производство для жестко привязанных ресурсов сформированы; p_5 – заказы на закупку и производство для не жестко привязанных ресурсов сформированы. Переходы сети: t_1 – процесс составления графика производства; t_2 – процесс определения жестко привязанного спроса на материальные ресурсы, генерация заказов для жесткопривязанных ресурсов;

t_3 – определение не жестко привязанного спроса на материальные ресурсы, генерация заказов для не жесткопривязанных ресурсов.

Обеспечение влияния управляющих воздействий на производственный процесс требует введения дополнительных элементов в структуру сети, изображенной на рис. 5. Например (см. рис. 7): t_4 – переход, моделирующий процессы передачи плановых заказов производственными подразделениям; p_6 – место, моделирующее дополнительное условие на срабатывание переходов, т.е. обеспечивающее дополнительное условие на выполнение технологического или логистического процесса. Другими словами, ни один из процессов на производстве не будет выполняться до тех пор, пока плановая служба не сформирует определенный заказ-задание.

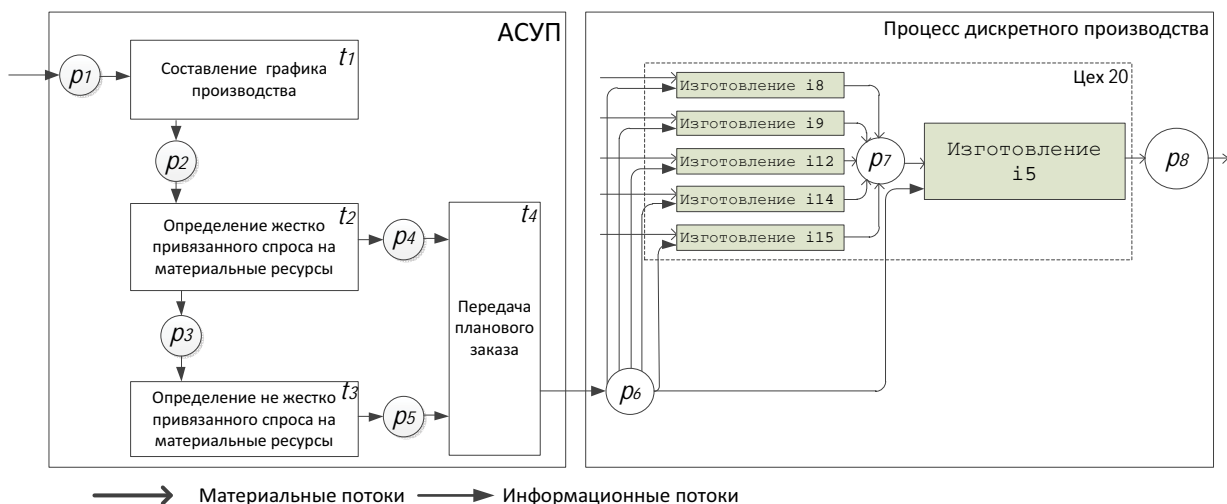


Рис. 7. Воздействие УУ на ОУ по средствам плановых заказов на закупку и производство

Передача заказа является командой к закупке или производству и фактически соответствует вектору управляющего воздействия. Пример элемента вектора U , моделирующего производственный заказ на изготовление клапана управления фонарем в количестве 2 шт. к 1 октября 2012 г., выглядит так: $u = ("i_5", 2, "01.10.2012")$. Реализация передачи подобной ин-

Степаненко В. Е., Фролов Д. Н.

МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДИСКРЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ЦВЕТНЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

формации в описываемой модели происходит за счет механизмов цветных сетей Петри. Согласно [3], маркер ЦСП имеет некоторую информационную характеристику (цвет). В нашем случае с помощью подобных характеристик будет организована возможность учета количества и типа ресурса в процессе производства. Цветовые характеристики в модели ЦСП задаются при помощи следующих элементов: Σ , $C(P)$.

Σ – конечное множество непустых цветных наборов, в нашем случае имеет вид:

ITEM – текстовое значение, предназначенное для хранения номенклатурного номера ресурса;

QUAN – действительное значение, 15 символов до запятой 5 после, предназначено для хранения информации о количестве ресурса;

PROG – текстовое значение длиной 6 символов, предназначено для хранения информации о назначении ресурса (производственная программа);

CPRJ – текстовое значение длиной 6 символов, предназначено для хранения информации о назначении ресурса (производственный заказ);

ESEQ – текстовое значение длиной 6 символов, предназначено для хранения информации о назначении ресурса (серийный номер машины);

STOCK – кортеж из 2 элементов, который имеет вид (ITEM, QUAN), предназначен для хранения информации об анонимном запасе (запас не привязан к конкретному производственному заданию);

STOCK_PROG – кортеж из 5 элементов, который имеет вид (ITEM, QUAN, PROG, CPRJ, ESEQ), предназначен для хранения информации о запасе, имеющем жесткую привязку к производственному заданию.

$C(p)$ – функция набора цветов, которая назначает на каждое из мест свой набор цветов. После определения данной функции каждое место сети получает один из двух цветов STOCK или STOCK_PROG. То есть каждое из мест может моделировать наличие либо анонимного, либо жестко-привязанного ресурса.

Для обеспечения учета временной характеристики в модели предлагается использовать механизм, предложенный в источнике [2]. Для учета времени предлагается:

– для каждого перехода t_i ЦСП ввести определенную величину, характеризующую время выполнения процесса (технологического или логистического);

– для маркера, моделирующего движение ресурса, ввести переменную величину, способную накапливать время, затраченное на срабатывание каждого перехода, имеющего временную характеристику;

– в случае, если для перехода t_i во входных позициях имеются маркеры, имеющие разные временные характеристики, то маркер, помещающийся в выходную позицию, получает значение наибольшей временной характеристики.

Описанная выше модель показывает, как на основе методологии ЦСП, изложенной в источнике [2], можно описать процесс дискретного производства, а также механизмы управления движением материальных ресурсов при помощи АСУП. Подобная модель способна оказать значительную информационную поддержку лицу, принимающему решение, и лечь в основу инструмента имитационного моделирования процессов дискретного машиностроительного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1 Степаненко, В. Е. Метод имитационного моделирования организации производственных процессов с использованием расширенных сетей Петри / В. Е. Степаненко, Д. Н. Фролов, Б. Н. Марьин // Ученые записки КнАГТУ. – 2011. – №III-1(7). – 71-78 с.

2 Kurt Jensen, Lars M. Kristensen; Coloured Petri Nets Modelling and Validation of Concurrent Systems; Springer; 2009. – 384 с.

Зарубин М. М.
M. M. Zarubin

**О МЕТОДЕ ОТЫСКАНИЯ НАТУРАЛЬНЫХ ЧИСЕЛ,
ИМЕЮЩИХ ЗАДАННУЮ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОСТАТКОВ
ОТ ДЕЛЕНИЯ НА ПРОИЗВОЛЬНЫЙ КОРТЕЖ**

**ON THE METHOD OF FINDING NATURAL NUMBERS WITH A FIXED SEQUENCE
OF THE RESIDUES MODULO RANDOM OF TUPLES**

Зарубин Михаил Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики и информатики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8 914 210 01 50. E-mail: zmm52@mail.ru.

Mr. Michael M. Zarubin – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Computer Science of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenina, 27; 8 914 210 01 50. E-mail: zmm52@mail.ru.

Аннотация. Решается задача отыскания чисел, имеющих заданный кортеж остатков от целочисленного деления на произвольный заданный кортеж натуральных чисел. Приводится алгоритм решения поставленной задачи.

Summary. We solve the problem of finding the numbers with a given tuple remnants of the integer division by an arbitrary predetermined sequence of natural numbers. An algorithm for solving this problem.

Ключевые слова: натуральные числа, целочисленные, остатки от деления.

Key words: natural numbers, integers, the remnants of the division.

УДК 511.1

Постановка задачи.

Имеется произвольный кортеж натуральных чисел, т.е. конечная последовательность натуральных чисел $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$.

Задан кортеж $\langle b_1, b_2, \dots, b_n \rangle$ остатков от деления натурального числа c на числа a_i , $0 \leq b_i < a_i$, $i = 1, 2, \dots, n$.

Требуется отыскать число c , обладающее заданными остатками b_i при делении на a_i , $i = 1, 2, \dots, n$.

Предлагается следующий метод решения поставленной задачи, т.е. отыскания натуральных чисел c , обладающих заданными выше свойствами.

Числа, имеющие остаток b_1 при делении на a_1 , можно записать в виде

$$c = b_1 + a_1 \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Придавая m в (1) последовательные значения $0, 1, 2, \dots$, отыскиваем m_1 такое, что число $b_1 + a_1 \cdot m_1$ при делении на a_2 дает остаток b_2 .

Тогда числа вида

$$c = b_1 + a_1 \cdot m_1 + a_1 \cdot a_2 \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

при делении на a_1 дают остаток b_1 , а при делении на a_2 дают остаток b_2 .

Зарубин М.М.

О МЕТОДЕ ОТЫСКАНИЯ НАТУРАЛЬНЫХ ЧИСЕЛ, ИМЕЮЩИХ ЗАДАННУЮ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОСТАТКОВ ОТ ДЕЛЕНИЯ НА ПРОИЗВОЛЬНЫЙ КОРТЕЖ

Придавая m в (2) последовательные значения $0, 1, 2, \dots$, отыскиваем m_2 такое, что число $b_1 + a_1 \cdot m_1 + a_1 \cdot a_2 \cdot m_2$ при делении на a_3 дает остаток b_3 .

Тогда числа вида

$$c = b_1 + a_1 \cdot m_1 + a_1 \cdot a_2 \cdot m_2 + a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

при делении на a_1 дают остаток b_1 , при делении на a_2 дают остаток b_2 , при делении на a_3 дают остаток b_3 .

Продолжая процесс, получим последовательность натуральных чисел c_m , обладающих требуемыми свойствами:

$$c_m = b_1 + a_1 \cdot m_1 + a_1 \cdot a_2 \cdot m_2 + \dots + a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_{n-1} \cdot m_{n-1} + a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n \cdot m, \quad (4)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$.

В качестве иллюстрации метода решим следующую задачу: найти натуральное число, дающее остаток 1 при делении на 2 , остаток 2 при делении на 3 , остаток 3 при делении на 4 , остаток 4 при делении на 5 , остаток 5 при делении на 6 , остаток 6 при делении на 7 .

Решение

Числа, дающие остаток 1 при делении на 2 , имеют вид

$$c = 1 + 2 \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

Придавая m в (5) последовательные значения, находим число 5 ($m = 2$), дающее при делении на 3 требуемый остаток 2 .

Тогда числа вида

$$c = 5 + 2 \cdot 3 \cdot m = 5 + 6 \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

дают остаток 1 при делении на 2 и остаток 2 при делении на 3 .

Придавая m в (6) последовательные значения, находим число 11 ($m = 1$), дающее при делении на 4 требуемый остаток 3 .

Тогда числа вида

$$c = 11 + 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot m = 11 + 24 \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

дают остаток 1 при делении на 2 , остаток 2 при делении на 3 , остаток 3 при делении на 4 .

Придавая m в (7) последовательные значения, находим число 59 ($m = 2$), дающее при делении на 5 требуемый остаток 4 .

Тогда числа вида

$$c = 59 + 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot m = 59 + 120 \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

дают остаток 1 при делении на 2 , остаток 2 при делении на 3 , остаток 3 при делении на 4 , остаток 4 при делении на 5 .

Придавая m в (8) последовательные значения, находим число 59 ($m = 0$), дающее при делении на 6 требуемый остаток 5 .

Тогда числа вида

$$c = 59 + 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot m = 59 + 720 \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

дают остаток 1 при делении на 2 , остаток 2 при делении на 3 , остаток 3 при делении на 4 , остаток 4 при делении на 5 , остаток 5 при делении на 6 .

Наконец, придавая m в (9) последовательные значения, находим число 2939 ($m = 4$), дающее при делении на 7 требуемый остаток 6 .

Тогда числа вида

$$c = 2939 + 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 \cdot m = 2939 + 5040 \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

дают остаток 1 при делении на 2 , остаток 2 при делении на 3 , остаток 3 при делении на 4 , остаток 4 при делении на 5 , остаток 5 при делении на 6 , остаток 6 при делении на 7 .

Решением задачи будут, например, числа: 2939 , 7979 , 13019 и т.д., см. формулу (10).

В данной работе не акцентируется вопрос о существовании m_i – считается, что они существуют на каждом шаге алгоритма (если, конечно, поставленная задача имеет решение для заданных кортежей).

По этому поводу отметим следующее.

Так как формула (1) описывает все натуральные числа, дающие остаток b_1 при делении на a_1 , то вопрос существования m_1 сводится к равенству: $b_1 + a_1 \cdot m_1 = b_2 + a_2 \cdot m$, то есть к линейному диофантову уравнению

$$a_1 \cdot x + a_2 \cdot y = b, \quad (11)$$

где $b = b_2 - b_1$.

Как известно, (см. [1]), необходимое и достаточное условие разрешимости (11) состоит в том, что b нацело делится на наибольший общий делитель чисел a_1 и a_2 – $\text{НОД}(a_1, a_2)$.

Например, обязательно найдется m_1 для кортежей вида: $\langle a_1 = 15, a_2 = 6, \dots \rangle$, $\langle b_1 = 10, b_2 = 4, \dots \rangle$ или $\langle b_1 = 11, b_2 = 8, \dots \rangle$ и не найдется для кортежей вида: $\langle a_1 = 15, a_2 = 6, \dots \rangle$, $\langle b_1 = 10, b_2 = 5, \dots \rangle$ или $\langle b_1 = 10, b_2 = 8, \dots \rangle$, так как в первом случае $b = b_2 - b_1$ делится нацело на $\text{НОД}(a_1, a_2) = 3$, а во втором – нет.

Таким образом, несуществование числа m_1 для реализации предложенного алгоритма равносильно тому, что для заданных кортежей $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$, $\langle b_1, b_2, \dots, b_n \rangle$ не имеет решения сама поставленная задача.

При $i \geq 2$ аналогичное утверждение для m_i неверно. Причина в том, что формула (4) не обязательно описывает всю совокупность натуральных чисел, обладающих заданным свойством (дающих остатки b_i при делении на a_i), а лишь выделяет бесконечную последовательность таких чисел.

Путем редукции к соответствующим диофантовым уравнениям можно выписать лишь необходимые условия, которым должны удовлетворять компоненты кортежей для того, чтобы поставленная задача имела решение. При этом вопрос существования m_i ($i \geq 2$) для построения последовательности c_m по формуле (4) остается открытым.

Полученные результаты могут быть использованы при решении задач, связанных с поиском оптимального решения в самых различных предметных областях, например, оптимизации процессов в металлургии [2], имитационном моделировании [3], [4] и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серпинский, В. О решении уравнений в целых числах / В. Серпинский; пер. с польского И.Г. Мельникова. – М.: Физматлит, 1961. – 88 с.
2. Черномас, В. В. Параметрическое трехмерное моделирование установки вертикального литья и деформации металла / В. В. Черномас, С. В. Ланкина, С. Р. Саликов, Н. Ю. Лушников // Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. – 2012. – № I-1(9). – С. 90-93.
3. Степаненко, В. Е. Метод прогноза и оценки состояния процессов обеспечения агрегатной сборки стандартизированными материальными ресурсами / В. Е. Степаненко, Д. Н. Фролов // Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. – 2012. – № I-1(9). – С. 83-89.
4. Приходько, Н. Б. Об исследовании эффективности уменьшения массы крыла унифицированного самолета / Н. Б. Приходько // Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. – 2011. – № IV-1(8). – С. 9-11.

Скачков М. Н.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ГРАНУЛЯРНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ
В СВЕТЕ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ МОДЕЛИ СЫПУЧИХ СРЕД

Скачков М. Н.

M. N. Skachkov

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ГРАНУЛЯРНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ
В СВЕТЕ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ МОДЕЛИ СЫПУЧИХ СРЕД**

**SOME ISSUES CONCERNING THE GRANULAR GAS DYNAMICS IN THE LIGHT OF
THE MULTIPLICATIVE MODEL OF GRANULAR MEDIA**



Скачков Михаил Николаевич – ассистент кафедры «Высшая математика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mn-skachkov@rambler.ru.

Mr. Mikhail N. Skachkov – Assistant Professor, Department of Higher Mathematics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: mn-skachkov@rambler.ru.

Аннотация. Предложенная ранее статическая мультипликативная модель сыпучих материалов допускает расширения на вопросы динамики. В русле развития этой модели настоящая статья даёт новое толкование гранулярной температуры. Предложенное для статических задач понятие уплотняемости трансформируется в динамическую уплотняемость. Как обобщение этих двух характеристик вводится смешанная уплотняемость. Формулируются уравнения состояния идеального и ван-дер-ваальсова гранулярных газов. Найдена функциональная зависимость смешанной уплотняемости от её статического и динамического эквивалентов. Записано уравнение состояния ван-дер-ваальсова гранулярного газа для снега.

Summary. A previously proposed static multiplicative model of granular materials allows extensions to dynamics issues. In keeping with the development of this model, the paper provides a new interpretation of the granular temperature. The concept of compactability as it was proposed for static problems, is transformed now into a dynamic one. As a generalization of the above two characteristics a concept of mixed compactability is introduced. We formulate equations of state for both the ideal and van der Waals granular gases. We demonstrate the functional relationship between mixed compactability and its static and dynamical equivalents. A van der Waals granular gas equation of state is written.

Ключевые слова: сжимаемая сыпучая среда, снег, мультипликативная модель, уплотняемость, идеальный и ван-дер-ваальсов гранулярные газы.

Key words: compressible granular medium, snow, multiplicative model, compactability, ideal granular gas, van der Waals granular gas.

УДК 539.3+533.7

Введение

При моделировании быстрых турбулентных потоков сыпучих веществ многие исследователи активно разрабатывают концепцию *гранулярной температуры*, применяя её как к относительно сплочённым, так и к разреженным зернистым совокупностям. Подвижные тесно упакованные вещества называют *гранулярной жидкостью*, разреженные – *гранулярным газом*. Определения гранулярной температуры в различных публикациях [2; 3; 4; 6] порой отличаются на постоянный множитель, введённое П.К. Хаффом [3] понятие задают и как среднюю кинетическую энергию трансляционного движения гранул, и – при изучении агрегатов равновеликих частиц – как флуктуацию или дисперсию распределения их скорости.

В работе [5] автор предложил нелинейную статическую модель поведения сжимаемых сыпучих материалов при всестороннем сжатии, названную *мультипликативной*. В настоящей статье раскрывается ресурс развития этой статической модели на некоторые вопросы динамики гранулярных газов.

Гранулярная температура и две модели гранулярного газа в терминах мультипликативного подхода

В рамках мультипликативной модели сыпучих материалов была установлена необходимость существования материальной константы $\kappa (> 0)$, называемой *уплотняемостью* и отражающей способность зернистого массива при всестороннем сжатии изменять свою исходную конфигурацию на более компактную:

$$\kappa = - \frac{d\theta}{\theta dp},$$

где θ – пористость; p – давление. В случае предельной рыхлости, то есть при $\theta \rightarrow 1$, интегралу данной зависимости можно придать вид

$$\kappa p = \frac{M}{\rho_s V}, \quad (1)$$

где M и V – масса и объём тела; ρ_s – принимаемая постоянной плотность скелета (твёрдой фазы пористого массива). Иначе говоря,

$$pV = \frac{M}{\kappa \rho_s} = \text{const}. \quad (2)$$

Найденное соотношение переключается с газовым законом Бойля-Мариотта.

Попытаемся продолжить вырастающую из логики мультипликативной модели аналогию между сыпучим веществом и идеальным газом. Для этого обратимся к подвижной разреженной сыпучей среде, перенеся на неё концепцию уплотняемости и прибегнув к идее гранулярной температуры. Гранулярную температуру введём аналогично тому, как в молекулярно-кинетической теории газов вводится абсолютная температура:

$$T' = \frac{mD_v}{3k}, \quad (3)$$

где m – средняя масса гранулы; D_v – флуктуация поступательной скорости частиц (признаваемых разновеликими); k – постоянная Больцмана. Здесь $D_v = \langle (\mathbf{v}_n - \langle \mathbf{v} \rangle)^2 \rangle$, при этом угловые скобки показывают усреднение по массе, так $\langle \mathbf{v} \rangle = 1/M \sum_n m_n \mathbf{v}_n$, где m_n и \mathbf{v}_n – масса и вектор скорости n -й частицы сыпучего тела. Отметим, что распределение скоростей даже равновеликих частиц гранулярного газа, вообще говоря, отклоняется от распределения Максвелла [2].

Ранее при выводе формулы (2) подразумевалось, что высокая рыхлость гранулярного тела обусловлена предельной пористостью, ажурностью как самих гранул, так и их упаковки. В соответствии с принципами мультипликативной модели гранулы понимались неподвижными, пребывающими в статическом контактном взаимодействии и достаточно пространственно протяжёнными. Сейчас мы, напротив, рассматриваем разреженное сыпучее вещество с быстрым хаотичным движением частиц. В таком динамическом состоянии они взаимодействуют через соударения и выступают как материальные точки.

Уплотняемость κ первоначально была выведена как статическая характеристика материала. Связывая же её со скоростями частиц, мы сообщаем этому термину новый смысловой оттенок, требующий отражения в обозначении. Под символом κ' будем понимать *динамическую уплотняемость* – меру податливости гранулярного газа к уплотнению.

Скачков М. Н.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ГРАНУЛЯРНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ
В СВЕТЕ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ МОДЕЛИ СЫПУЧИХ СРЕД

Выясним количественное выражение динамической уплотняемости как характеристики гранулярного газа, приписав ему черты и рыхлого статического сыпучего вещества, и идеального газа. Сопоставляя (2) с уравнением Клапейрона-Менделеева и заменяя T на T' и κ на κ' , имеем:

$$R \frac{T'}{\mu} = \frac{1}{\kappa' \rho_s}, \quad (4)$$

где μ — масса моля гранулярного газа (вычисляемая ниже). Отсюда

$$T' = \frac{\mu}{R \kappa' \rho_s}. \quad (5)$$

Вычисляя μ , будем руководствоваться стандартным определением молярной массы [1]: $\mu = N_A m$, где N_A — число Авогадро. Внося данное представление в (5), получаем:

$$T' = \frac{N_A m}{R \kappa' \rho_s}.$$

Этот результат перепишем, прибегнув к известной связи между термодинамическими константами R , N_A и k :

$$T' = \frac{m}{k \kappa' \rho_s}. \quad (6)$$

Сравнивая (3) и (6), после очевидных преобразований устанавливаем:

$$\kappa' = \frac{3}{\rho_s D_v}. \quad (7)$$

Видно, что динамическая уплотняемость в отличие от своего статического эквивалента уже не является константой материала. Её значение зависит от распределения скорости его частиц. Последняя формула также отражает ту интуитивно понятную закономерность, что чем интенсивнее «бурлит» гранулярный газ, тем сильнее он сопротивляется уплотнению.

Высокая пористость статической (твердотельной) гранулярной среды, описываемой соотношением (1), достигается как за счёт предельно рыхлой упаковки гранул, так и за счёт их собственной ажурности. В состоянии гранулярной среды, уподобляемом идеальному газу и описываемом соотношением (4), высокая пористость достигается за счёт движения гранул относительно друг друга. Развивая газовую аналогию, рассмотрим смешанное состояние разреженной гранулярной среды, совмещающее качества твёрдой стадии и стадии идеального газа, — гранулярный «ван-дер-ваальсов» газ.

Введём *смешанную уплотняемость* $\tilde{\kappa}$ — величину, неким образом зависящую от статической и динамической уплотняемостей и удовлетворяющую обобщённое на ван-дер-ваальсов случай соотношение (1):

$$\tilde{\kappa} p = \frac{M}{\rho_s V}. \quad (8)$$

У идеального гранулярного газа уравнение состояния записывается как

$$pV = \frac{M}{\mu} RT'.$$

Соответственно, для ван-дер-ваальсова гранулярного газа без притяжения между частицами должно быть справедливо свойство

$$p(V - V_0) = \frac{M}{\mu} RT', \quad (9)$$

где V_0 означает объём тела в отсутствие движения гранул. Отметим, что уравнения состояния идеального и ван-дер-ваальсова гранулярных газов вместе составляют логическую оппозицию того же рода, что и пара уравнений («молекулярного» газа) Клапейрона-Менделеева и



Ван-дер-Ваальса. Из соотношений (1) и (8), а также связи объёма с массой и плотностью вытекает:

$$V = \frac{M}{\rho_s \tilde{\kappa} p}, \quad V_0 = \frac{M}{\rho_s \kappa p}. \quad (10)$$

Подставив (10) в левую часть формулы (9), а (4) – в её правую часть, после элементарных преобразований находим:

$$\tilde{\kappa} = \frac{\kappa \kappa'}{\kappa + \kappa'}. \quad (11)$$

Видно, что выявленная зависимость обеспечивает предельный переход от динамики к статике: $\tilde{\kappa} \rightarrow \kappa$, при $\kappa' \rightarrow \infty$, то есть при $D_v \rightarrow 0$. Структура этой зависимости отсылает нас к электрической аналогии. Последняя указывает, что величина $\tilde{\kappa}$ вычисляется через величины κ и κ' так же, как общее сопротивление участка электрической цепи через сопротивления двух проводников, соединённых параллельно.

Полученные результаты могут быть актуальными при моделировании разреженных потоков снега, для которого характерны высокие значения пористости и уплотняемости. Использование соотношений (7), (8) и (11) даёт ещё одно представление уравнения состояния ван-дер-ваальсова гранулярного газа:

$$pV = \frac{M (\rho_s \kappa D_v + 3)}{3 \rho_s \kappa}.$$

Подставляя сюда данные по снегу из источника [5], имеем следующее, выраженное в единицах СИ, приближённое описание снежного ван-дер-ваальсова гранулярного газа: $pV = M (0.33 \cdot D_v + 11.61)$. Или с привлечением плотности ρ , $p = \rho (0.33 \cdot D_v + 11.61)$.

Заключение

В предлагаемой работе, благодаря гранулярно-газовой аналогии, осуществлён переход от статической мультипликативной модели сыпучих сред к её расширенной на некоторые вопросы динамики версии, сохраняющей вместе с тем идеологию модели. Ключевым звеном этого перехода явилось формальное отождествление гранулярной и обычной, термодинамической температуры.

Автор признателен д-ру физ.-мат. наук, проф. А.В. Викулину за мнение и мысли, высказанные по поводу данного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фундаментальные физические константы / ГСССД 1-87. – М.: Госком СССР по стандартам, 1989. – 7 с.
2. Brilliantov, N. V. Kinetic Theory of Granular Gases / N. V. Brilliantov, T. Pöschel. – Oxford: Oxford University Press, 2004. – 339 p.
3. Haff, P. K. Grain flow as a fluid-mechanical phenomenon / P. K. Haff // J. Fluid Mech. – 1983, 134. — Pp. 401-430.
4. Serero, D. The classical granular temperature and slightly beyond / D. Serero, C. Goldenberg, S.H. Noskowitz, I. Goldhirsch // Powder Technology. – 2008, Vol. 182, Num. 2. – Pp. 257-271.
5. Skachkov, M. N. Density and pressure in granular media in the gravity field / M. N. Skachkov // Journal of Mining Science. – 2011, Vol. 47, Num. 1. – Pp. 30-36.
6. Zamankhan, P. Complex flow dynamics in dense granular flows. Pt. II. Simulations / P. Zamankhan, Jun Huang // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 2007, Vol. 74, Num. 4. – Pp. 691-702.

Олейников А. И., Бормотин К. С., Ноговицын А. М.
МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПРОЦЕССА КЛЕПКИ ПАНЕЛЕЙ

Олейников А. И., Бормотин К. С., Ноговицын А. М.
A. I. Oleinikov, K. S. Vormotin, A. M. Nogovitsin

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПРОЦЕССА КЛЕПКИ ПАНЕЛЕЙ

SIMULATION AND COMPUTING OF THE PROCESS OF PANEL RIVETING



Олейников Александр Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой механики и анализа конструкций и процессов Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 8-914-177-28-18. E-mail: a.i.oleinikov@mail.ru, cvmi@knastu.ru

Mr. Alexander I. Oleinikov – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Mechanics/Analysis of Structures and Processes, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur; phone: + 7 914 1772818. E-mail: a.i.oleinikov@mail.ru, cvmi@knastu.ru



Бормотин Константин Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механики и анализа конструкций и процессов Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 8-924-228-48-17. E-mail: cvmi@knastu.ru

Mr. Konstantin S. Vormotin – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Mechanics/Analysis of Structures and Processes, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur. E-mail: cvmi@knastu.ru



Ноговицын Александр Михайлович – студент кафедры механики и анализа конструкций и процессов Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия). E-mail: hamm90@mail.ru

Mr. Alexander M. Nogovitsin - student at the Department of Mechanics/Analysis of Structures and Processes, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, Komsomolsk-on-Amur. E-mail: hamm90@mail.ru.

Аннотация. Проводится моделирование процесса высокоресурсного заклепочного соединения панели с ребрами жесткости. Разрабатывается алгоритм определения упреждающих кривизн ребер, который обеспечивает заданные геометрические параметры клепаных панелей.

Summary. The paper is concerned with mathematical modelling of the process of high-endurance riveted jointing of panels to stiffener ribs. An algorithm is offered for definition of the pre-shaped curvature of ribs needed to ensure the aimed geometry parameters of riveted panels.

Ключевые слова: клепка панелей, ребра жесткости, пластичность, обратная задача, геометрические параметры.

Key words: panel riveting, stiffener ribs, plasticity, inverse problem, geometrical parameters.

УДК 539.374+624.078.44

Введение. При клепочной сборке обшивок может наблюдаться существенное отклонение геометрических параметров от заданных, несмотря на то что до сборки панель и ребра имели геометрические параметры в заданном допуске. Для цилиндрических панелей одинар-

ной кривизны эти отклонения приводили, в основном, к выходу обшивки из теоретической поверхности путем изгиба в нормальной плоскости. Для трапециевидных панелей двойной кривизны наблюдаются также и недопустимые прогибы в касательной плоскости. В данных условиях обеспечение геометрии обшивки может быть достигнуто использованием упреждений ребер. Для цилиндрических панелей одинарной кривизны искомые упреждения ребер обычно являются изгибом в нормальной плоскости и поэтому в принципе могут быть подобраны опытным путем. Недостатком такого определения упреждений являются большие материальные и временные затраты, которые приходится почти полностью снова нести при каждом существенном изменении геометрических параметров конструкции обшивки, которые на этапе постановки серийного производства, как правило, изменяются неоднократно. Более того, для трапецеидальных панелей двойной кривизны упреждения ребра, очевидно, являются сложным изгибом с кручением. Определить искомый изгиб и кручение опытным путем практически невозможно.

В данной работе предлагается численный метод моделирования процесса клепки и определения упреждений ребер, обеспечивающий заданные геометрические параметры обшивок.

Уравнения деформирования тел из упругопластического материала. В процессе образования высокоресурсного заклепочного соединения происходит одновременная осадка замыкающей и закладной головок. Осадка головок клепки сопровождается интенсивным пластическим течением. Снятие усилий образует сложное распределение остаточных перемещений, деформаций и напряжений [2]. Вследствие этого при моделировании процесса клепки необходимо учитывать большие деформации и условия контакта. Учет больших пластических деформаций требует рассматривать модифицированную формулировку Лагранжа (Updated Lagrangian – UL), в которой в качестве отсчетной конфигурации берется текущая и используются истинные тензоры напряжений Коши и логарифмические тензоры деформаций Генки.

Вариационный принцип Хилла в текущей конфигурации формулируется в виде [1]

$$\delta I = 0, \tag{1}$$

где функционал

$$I(\mathbf{v}) \equiv \int_V [W(\mathbf{d}) + \frac{1}{2} \mathbf{s} : (\nabla \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}^T)] dV - \int_{S_T} \mathbf{t}^* \cdot \mathbf{v} dS.$$

При учете выполнения граничных условий для скоростей $\mathbf{v} = \mathbf{v}^*$ на S_u и определяющих соотношений между производной Трусделла от тензора напряжений Коши \mathbf{s}

$$\mathbf{s}^{Tr} = \dot{\mathbf{s}} - \mathbf{l} \cdot \mathbf{s} - \mathbf{s} \cdot \mathbf{l} + \mathbf{s} \text{tr} \mathbf{d}$$

(где \mathbf{l} – тензор градиента скорости, \mathbf{l} – транспонированный к нему тензор) и тензора скорости деформаций

$$\mathbf{d} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T),$$

$$\mathbf{s}^{Tr} = \frac{dW(\mathbf{d})}{d\mathbf{d}} \quad \text{или} \quad \mathbf{s}^{Tr} = \mathbf{C} \mathbf{d}$$

стационарное значение вариации функционала (2) будут доставлять уравнения равновесия и граничные условия соответственно:

$$\nabla \cdot (\mathbf{s}^{Tr} + \mathbf{s} \cdot \nabla \mathbf{v}) = \mathbf{0} \quad \text{в } V,$$

$$\mathbf{t} \equiv n \cdot (\mathbf{s}^{Tr} + \mathbf{s} \cdot \nabla \mathbf{v}) = \mathbf{t}^* \quad \text{на } S.$$

Инкрементальный аналог производной: ${}_t \mathbf{s}_{ij}^{Tr} = {}_t s_{ij} - {}^t s_{kj} u_{i,k} - {}^t s_{ik} u_{j,k} + {}^t s_{ij} u_{k,k}$.

В UL-формулировке все величины рассматриваются по отношению к некоторому моменту времени t , для которого напряженно-деформированное состояние предполагается известным.

То есть ${}^t S_{ij} = {}^t s_{ij}$, ${}^t S_{ij}$ – компоненты второго тензора напряжений Пиола-Кирхгофа в момент времени t , для которого в качестве отсчетной предполагается конфигурация в момент времени t ; ${}^t s_{ij}$ – компоненты тензора напряжений Коши в момент времени t , для которого отсчетной является конфигурация в тот же момент времени t . Компоненты тензора скорости деформаций записываются в виде

$$d_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}), \quad v_{i,j} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j}.$$

Компоненты линеаризованной части приращений деформаций

$${}^t e_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad u_i = {}^{t+\Delta t} u_i - {}^t u_i.$$

Так как компоненты ${}^t e_{ij}$ являются инкрементальным аналогом компонент тензора скоростей деформаций d_{ij} , то

$${}^t e_{ij} \approx d_{ij} \Delta t.$$

Дискретный аналог скалярного уравнения (1) с помощью метода конечных элементов приводится к уравнению

$${}^t \mathbf{K} \dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{R}}, \quad (2)$$

где ${}^t \mathbf{K}$ – симметричная матрица касательной жесткости, определенная в момент t ; $\dot{\mathbf{U}}$ – вектор скоростей перемещений узловых точек; $\dot{\mathbf{R}}$ – вектор внешних и внутренних сил.

При решении упругопластических задач методом последовательных приближений определяются аналоги инкрементальных компонент производной Трусделла от тензора напряжений Коши \mathbf{s} и тензора скорости деформаций.

Для определения матрицы ${}^t \mathbf{K}$ и вектора $\dot{\mathbf{R}}$ в системе алгебраических уравнений (2) и решения этой системы используется пакет MSC.Marc. Касательный модуль в определяющих соотношениях берется по кривой одноосного деформирования, построенной в осях «логарифмическая деформация» – истинное напряжение.

Расчет эквивалентного усилия клепки с натягом. Вследствие огромного количества клепочных соединений на крупногабаритных панелях и существенной физической, геометрической и контактной нелинейности задачи мы заменяем усилия, действующие на контакте между заклепкой и панелью, эквивалентными усилиями, вызывающими одинаковые перемещения вблизи заклепки.

Образцы-свидетели задаются со следующими геометрическими параметрами: длина и ширина 60 мм, а высота 5 мм; заклепка высотой 15 мм, диаметром 6 мм. Между образцами и заклепкой определяется контакт без трения.

Материал образцов – В95пчТ2, его механические характеристики таковы: модуль Юнга $E = 6027 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$, $\mu = 0,3$, предел текучести $\sigma_T = 43 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$, модуль линейного упрочнения $E_T = 282,4 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$, которые определяются по диаграмме деформирования.

Механические характеристики сплава В65 заклепки: $E = 7239,9 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$, $\mu = 0,3$, предел текучести $\sigma_T = 20,4 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$, модули линейного упрочнения: начальный $E_{T1} = 113,3 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$, второй при $\varepsilon^p = 0,3$, $E_{T2} = 6,8 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$ [2].

Решение проводится в два этапа: 1 – нагружение, приложение давления к торцу заклепки (см. рис. 1); 2 – разгрузка, уменьшение давления до нуля (см. рис. 2).

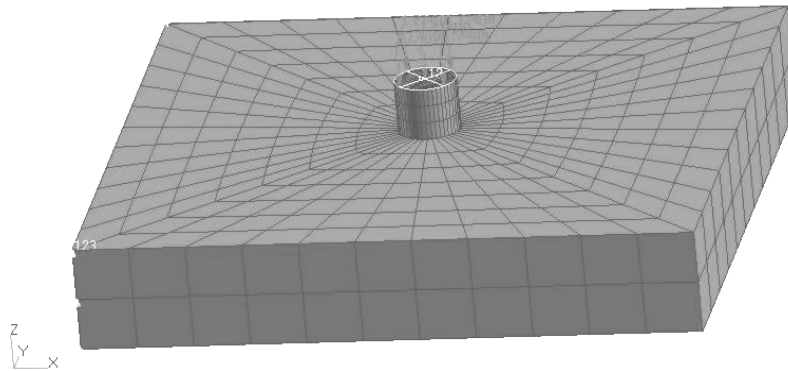


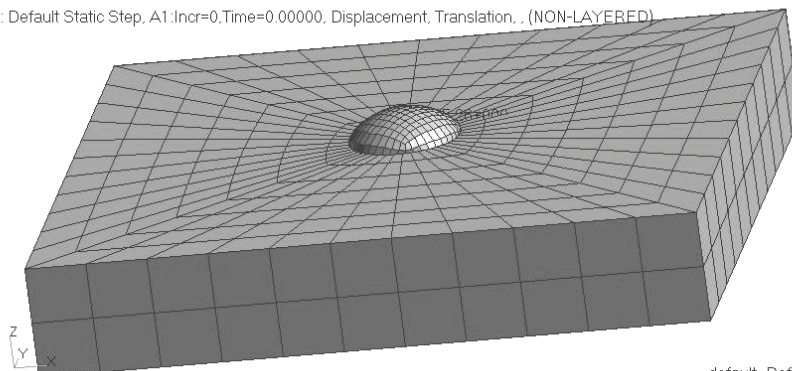
Рис. 1. Расчетная схема клепки образцов-свидетелей

Для оценки получаемого при данном усилии радиального натяга анализировалось поле радиальных остаточных перемещений у заклепки, из которого определялся фактический радиальный натяг по формуле $\Delta_n = \frac{d - d_0}{d_0} \times 100\% \approx 1.8\%$. Полученная оценка натяга укладывается в назначенный допуск $\Delta_n = 2.2 \pm 0.5\%$.

Найденное поле перемещений на границах образцов-свидетелей с заклепочным соединением должно соответствовать полю перемещений образцов-свидетелей с усилиями и контактным условием Glue (склейка) в месте клепки.

Patran 2008r1 22-Jun-11 12:29:21

Deform: Default Static Step, A1:Incr=0,Time=0.00000, Displacement, Translation, (NON-LAYERED)



default_Deformation :
Max 5.26+000 @Nd 1307

Рис. 2. Деформированная конфигурация при расклепывании

Анализ влияния маршрута клепки на напряженно-деформированное состояние панели. Отклонения при клепочной сборке обшивок можно минимизировать, используя определенный маршрут клепки. Для анализа влияния маршрута клепки на напряженно-деформированное состояние построена модель (см. рис. 3), характерная участку обшивки со стрингером.

Первая и вторая пластины имеют параметры 100×400×5 мм. Третья пластина имеет следующие параметры: 100×170×5 мм. В расчетах используется заклепка высотой 15 мм и диаметром 6 мм.

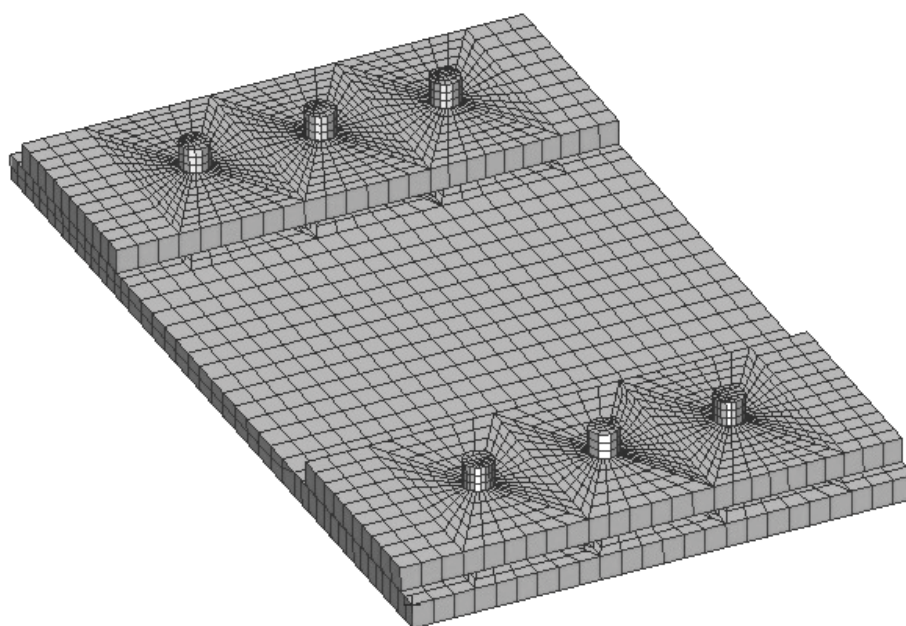


Рис. 3. Расчетная модель

Для определения маршрутов клепки введена нумерация заклепок (см. рис. 4). Решение для каждой заклепки проводится в два этапа: 1 – нагружение, приложение давления к торцу заклепки; 2 – разгрузка, уменьшение давления до нуля. Таким образом, в задаче граничные условия можно представить шестью вариантами нагружений, которые задаются отдельными LoadCase в MSC.Marc.

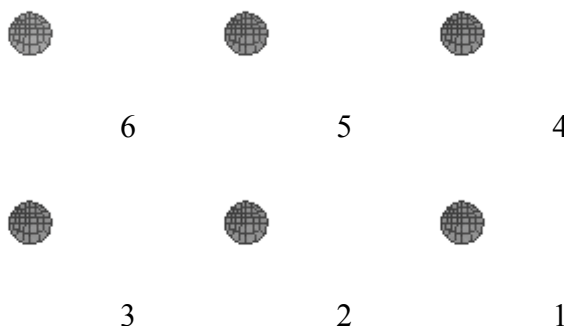


Рис. 4. Нумерация заклепок

Вариант маршрута клепки будем обозначать W_x , где x – номер варианта. Первый вариант ($W1$): мы прикладываем силу сначала к первой заклепке, далее ко второй, третьей, четвертой, пятой и в конце к шестой. Далее для сокращения записи будем записывать так: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$. Второй вариант ($W2$): $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 4$. Третий вариант ($W3$): $3 \rightarrow 5 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 2 \rightarrow 4$. Четвертый вариант ($W4$): $1 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 6$.

Условия закрепления панели: левый торец жестко закреплен, исключены перемещения панели по координате z .

Ниже представлены графики распределения остаточных перемещений узлов вдоль незакрепленной (правой) стороны панели (см. рис. 5) и вдоль нижнего торца (см. рис. 6).

Из анализа результатов данного расчета следует необходимость учета маршрута клепки с целью уменьшения отклонения при клепочной сборке обшивок.

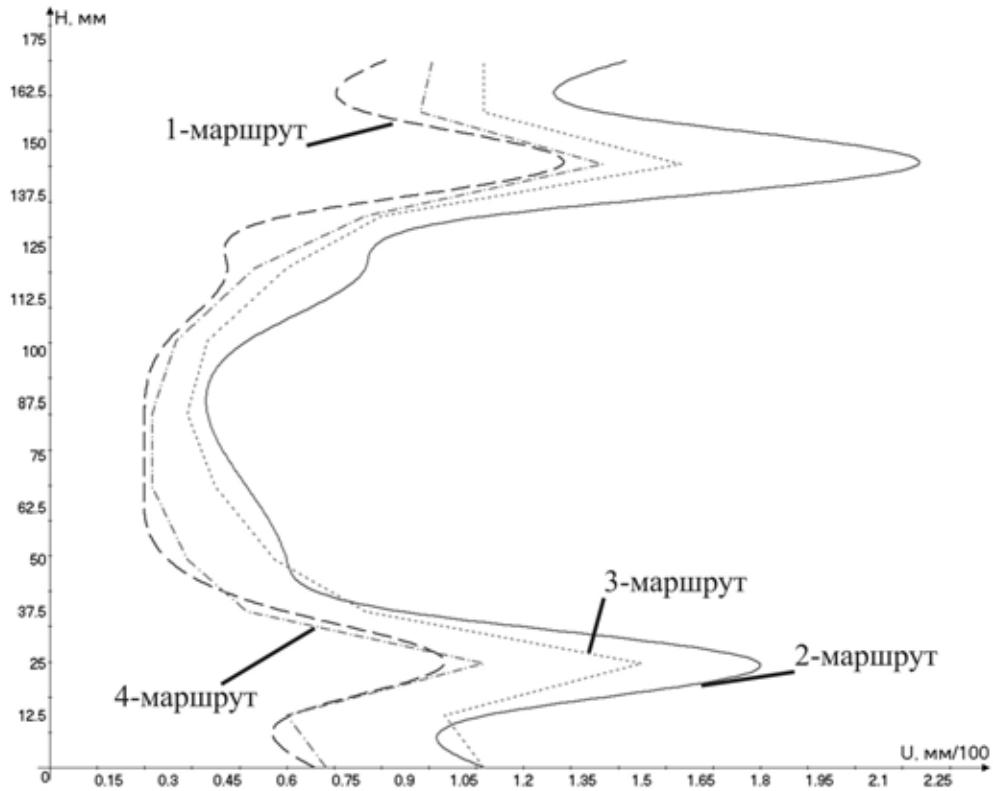


Рис. 5. График перемещений узлов вдоль направления оси x

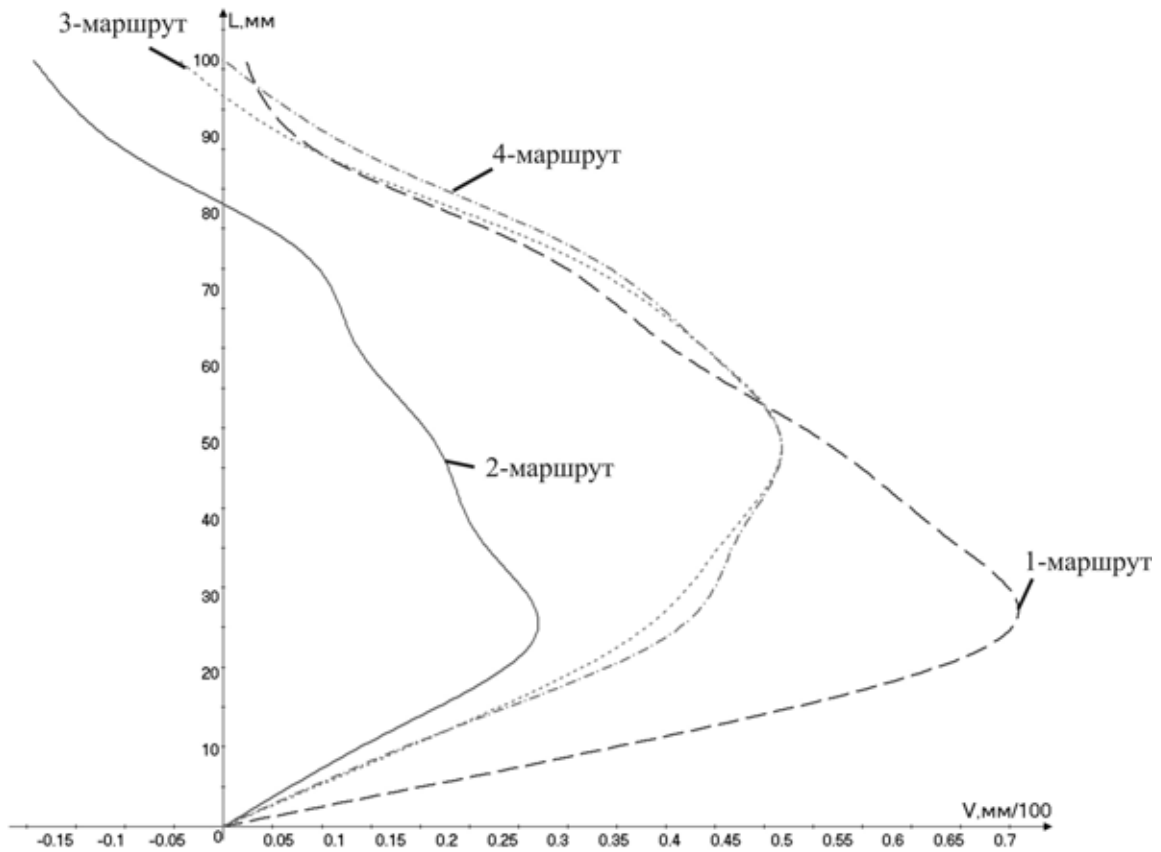


Рис. 6. График перемещений узлов вдоль направления оси y

При моделировании процесса клепки крыльевых панелей и стрингеров с помощью контактных условий возникают вычислительные трудности из-за большого количества клепок. С целью упрощения модели далее будем использовать эквивалентные силы.

Расчет конфигурации панели с приклепанным ребром жесткости и определение геометрических отклонений обшивки. Исходная форма рассматриваемой панели получена в режиме ползучести с учетом разных характеристик материала при растяжении и сжатии [3]. Расчет сводится к моделированию следующих этапов процесса клепки панелей:

1. Клепка технологических соединений на стапеле.
2. Клепка согласно заданному маршруту в условиях закрепления панели в паллете.
3. Разгрузка клепанной панели при снятии закреплений на паллете.

На этапе 1 к поверхностям конечных элементов в областях каждого технологического заклепочного соединения прикладывается определенное раннее давление клепки $P_0 = 4050/S$ кг/мм².

На этапе 2 аналогично этапу 1 и на основе данных о маршруте клепки задаются условия контакта и давление клепки $P_i(t) = P_0 \times m_i(t)$, $i = 1, \dots, n$, где n – количество нагруженных элементов, $m_i(t)$ – множители нагрузки каждого i -го элемента (функция $m_i(t)$ изменяется от 0 до 1 и учитывает нагрузку и разгрузку).

Искомую упреждающую кривизну стрингера (ребра жесткости) задаем перемещениями от заданной теоретической формы \hat{U} . Вычисление перемещений \hat{U} осуществляем по алгоритму последовательных приближений:

1. В качестве первого приближения назначается кривизна, равная обратной величине кривизны с перемещениями \hat{U}_1 , полученными в результате первого расчета.
2. Решение задачи получения кривизны текущего приближения. В результате в качестве решения этой задачи получаем модель стрингера с текущим упреждением.
3. Решение задачи изгиба стрингера с упреждением до теории панели.
4. Расчет конфигурации панели с приклепанным стрингером с данной упреждающей кривизной и определение отклонений от теории обшивки.

5. Проверка в MSC.Patran выполнения допуска r отклонений панели от теоретической конфигурации: $\|U_{i+1}\| \leq r$. Если данное неравенство не выполняется, то переходим к шагу 2; если выполняется, то конец алгоритма.

На рис. 7 представлено распределение напряжений после клепки стрингера.

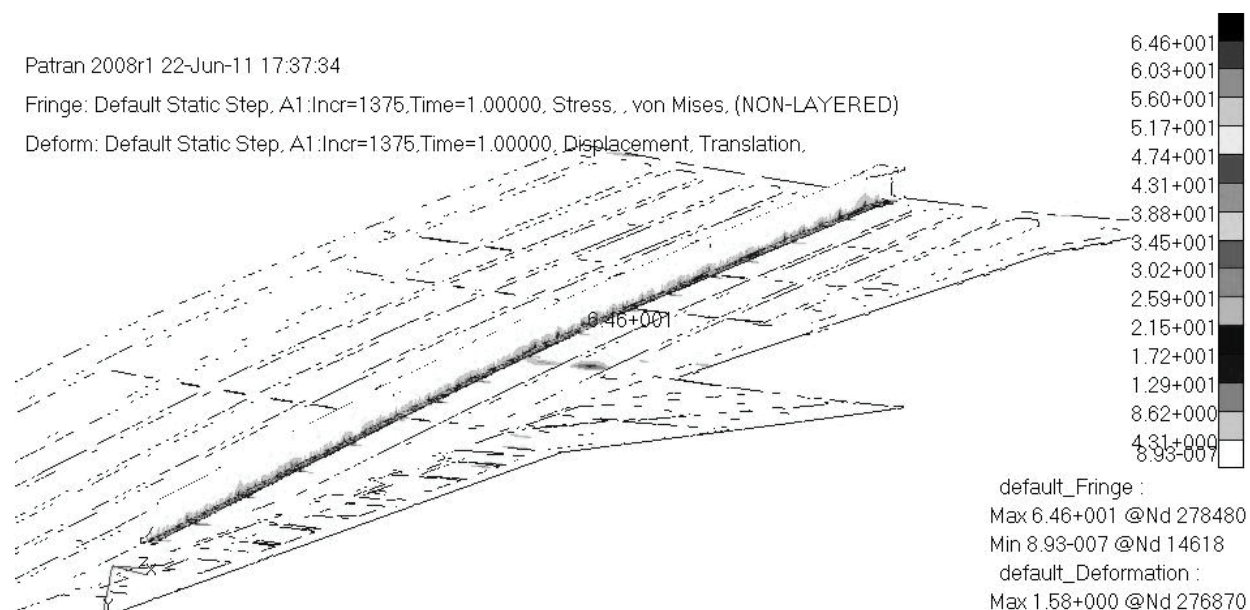


Рис. 7. Распределение напряжений после клепки стрингера

Электронная модель панелей и стрингеров в сборке изображена на рис. 8.

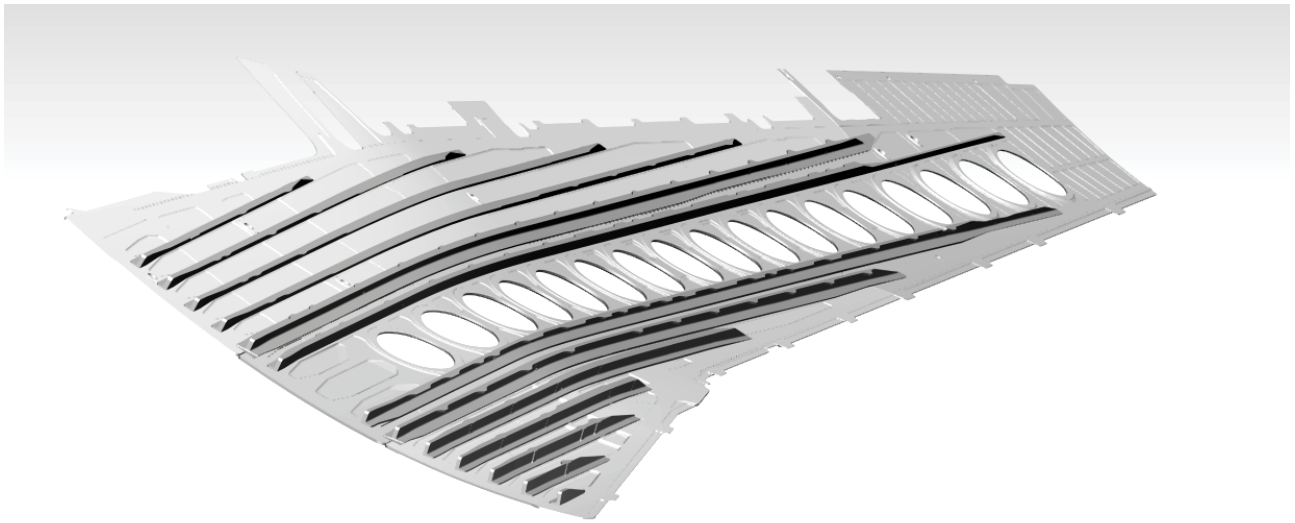


Рис. 8. Электронная модель панелей и стрингеров в сборке

Заключение. Разработанная модель процесса клепки, позволяющая эффективно рассчитывать реальные маршруты и последовательность приклепывания стрингеров, обеспечивает заданные геометрические параметры клепаных панелей обшивок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коробейников, С. Н. Нелинейное деформирование твердых тел / С. Н. Коробейников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
2. Непершин, Р. И. Анализ процесса осадки головок заклепочного соединения / Р. И. Непершин, В. В. Книгин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1992. – № 3. – С. 87-94.
3. Олейников, А. И. Тензорно-линейные модели установившейся ползучести трансверсально-изотропных материалов с разными характеристиками при растяжении и сжатии / А. И. Олейников // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № II-1(2). – С. 4-7.

МАШИНОСТРОЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING

Комельков В. Н., Смирнов В. Б., Марьин Б. Н., Ханов В. А.
V. N. Komelkov, V. B. Smirnov, B. N. Maryin, V. A. Khanov

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ВНЕСЕНИЯ
КОНСТРУКТИВНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В УСТРОЙСТВО РЕЖУЩЕЙ ГОЛОВКИ
УСТАНОВКИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ**

**THEORETICAL JUSTIFICATION OF A NEED TO MAKE CERTAIN CHANGES TO
THE DESIGN OF THE CUTTING HEAD OF A WATER JET MACHINE**

Комельков Василий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: vasko_72@mail.ru

Mr. Vasily N. Komelkov – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Welding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, 681013, city of Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Pr. E-mail: vasko_72@mail.ru

Смирнов Владимир Борисович – инженер-исследователь, ООО «Инжиниринговое агентство системных технологий» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681000, Комсомольск-на-Амуре, ул. Парижской Коммуны, д. 28, оф. 308. E-mail: iastcom61@mail.ru

Mr. Vladimir B. Smirnov – Research Engineer, LLC “Engineering Agency of System Technologies”, Russia, 681000, city of Komsomolsk-on-Amur, 28 Parizhskoy Kommuny Str., office 308. E-mail: iastcom61@mail.ru

Марьин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: maryinsb@mail.ru

Mr. Boris N. Maryin – Doctor of Engineering, Professor, Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, 681013, city of Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Pr. E-mail: maryinsb@mail.ru

Ханов Владимир Андреевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела информационных технологий ОАО «Амурский судостроительный завод» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681000, Комсомольск-на-Амуре, ул. Аллея Труда, 1. E-mail: vladimir.khanov@gmail.com

Mr. Vladimir A. Khanov – PhD in Engineering, Deputy Head of Information Technology Department, ОАО “Amurskiy sudostroitelnyy zavod” (JSC “Amur Shipbuilding Plant), Russia, 681000, city of Komsomolsk-on-Amur, 1 Truda Av. E-mail: vladimir.khanov@gmail.com

Аннотация. Приведено обоснование необходимости разработки комплекса технологических решений на внесение изменений в конструкцию режущей головки установки гидроабразивной резки для устранения конструктивных недостатков.

Summary. The paper offers theoretical justification of a necessity to work out a comprehensive technology solution concerning the changes to be made to the design of a cutting head of a water jet machine; the goal of this is to eliminate certain design flaws.

Ключевые слова: гидроабразивная резка, обработка материалов, заготовительное производство, коллиматор, режущая головка, резание.

Key words: water jet cutting, material processing, blank production, collimator, cutting head, cutting.



УДК 621.91.01

Заготовительное производство является частью любого технологического процесса, в ходе которой изготавливаются заготовки под сборку готовой конструкции. В настоящее время средняя трудоемкость заготовительных работ в машиностроении составляет 40...45 % общей трудоемкости производства машин. Главная тенденция в развитии заготовительного производства состоит в снижении трудоемкости операций резки и механической обработки при изготовлении деталей машин за счет повышения точности их формы и размеров [1].

Выбор того или иного способа резки, как основной операции заготовительного производства, обусловлен его достоинствами и недостатками. Основным недостатком самых распространенных термических способов резки металла является широкая зона термического влияния, приводящая к структурным изменениям материала, что в дальнейшем приводит к дефектам сварных швов, снижая качество конструкции в целом.

Во избежание подобных последствий, металл после термической резки подвергают ряду высокотратных термообрабатывающих операций. Необходимо отметить, что существует ряд материалов, которые нельзя подвергать термической резке. К ним относятся различные биметаллы, многослойные материалы, камень, стекло, текстолиты, композиционные материалы и т.д.

Гидроабразивная резка (ГАР) лишена большинства недостатков вышеперечисленных способов и представляет собой разделение металла при помощи направленной струи воды, находящейся под большим давлением. Для увеличения режущей силы в водяную струю добавляется абразив. Водяная струя по своим техническим возможностям приближается к идеальному точечному инструменту (лазеру), позволяя обрабатывать сложный профиль с любым радиусом закругления.

В гидроабразивных установках наименьшим сроком службы обладают такие комплектующие режущей головки (РГ), как водяное сопло и смесительная трубка (коллиматор). На продление срока службы именно этих элементов и будут направлены дальнейшие исследования.

Известно, что при постоянных системных значениях параметров управления процессом ГАР скорость реза увеличивается, а его стоимость уменьшается с увеличением расхода абразива. Основными системными параметрами процесса резки принято считать: давление рабочей жидкости; форму и диаметр отверстия сопла; расход абразива; скорость подачи (скорость реза) и др. Степень влияния отдельных параметров различна, но максимальное влияние на процесс резки оказывают параметр рабочего давления P и показатель абразивного насыщения струи жидкости A_i .

Анализ влияния рабочего давления P на процесс резки

Процесс резания возможен при условии, когда P на единицу площади поверхности реза материала превышает предел прочности данного материала.

Давление струи жидкости на поверхности реза P_c , Н, определяется формулой

$$P_c = (0,5 + e)10^{-6} r V_c^2 j f_c V_c^2,$$

где e – коэффициент сжатия струи (зависит от формы канала сопла); r – плотность рабочей жидкости; V_c – скорость истечения рабочей струи жидкости из сопла; j – коэффициент, учитывающий эффект растекания струи и изменения ее скорости (0,92...0,96); f_c – площадь поперечного сечения выходного отверстия сопла.

Численное значение скорости подачи РГ зависит от свойств разрезаемого материала. Снижение значения подачи ниже оптимального приводит к неэффективному использованию процесса резки, а при превышении оптимального значения – к снижению глубины реза.

Формула для определения силы резания P_z , МПа, с учетом скорости перемещения режущей головки относительно поверхности реза V_n ($V_n = f(S)$) имеет вид

$$P_z = (0,5 + e)10^{-6} \rho \varphi f_c V_c^2 (1 - \alpha)^2,$$

где ρ – плотность режущей струи жидкости; φ – угол отклонения струи от нормали к поверхности разрезаемого материала; α – отношение скорости перемещения режущей головки к скорости истечения струи жидкости ($\alpha = (V_n/V_c)$).

Физическая картина процесса резания

Процесс резания происходит за счет эрозионного воздействия на металл высокоскоростного потока твёрдых частиц. Отделение частиц разрезаемого материала состоит из комбинированного действия механизмов резки, хрупкого разрушения, усталости и плавления. Скорость процесса эрозии зависит от кинетической энергии частиц, механических свойств разрезаемого материала, угла атаки и формы частиц.

Согласно концепции М. Hashish, по толщине разрезаемого материала различают две зоны. На участке со стороны входа струи металл удаляется вследствие микрорежущего механизма действия струи с углом атаки, близким к 90° . По мере проникания струи вглубь металла изменяется угол атаки, струя теряет мощность, на плоскости реза со стороны выхода струи формируются бороздки. На этой стадии в основе механизма эрозии лежит деформационный износ. Вторую зону характеризует бороздчатость и волнистость поверхности.

Некоторые авторы предполагают, что сопротивление эрозии металла в верхней зоне разрезаемого сечения определяет его твёрдость, в нижней зоне – модуль Юнга. Устойчивость истечения и эффективность воздействия *двухфазной* струи обеспечивается, по их мнению, оптимальным размером частиц, равным 10...30 % диаметра режущей струи. Основным же недостатком метода резки при этом определяют косину плоскости реза (до $1,5^\circ$) [2].

Использование абразива в процессе резки имеет и недостатки, состоящие в снижении гидродинамических параметров струи, а именно: падает скорость струи при выходе из сопла, увеличивается угол расходимости, уменьшается длина начального участка струи. Увеличение угла расходимости приводит к увеличению пятна контакта струи с материалом и, как следствие, уменьшению удельного давления резания и увеличению энергоёмкости процесса по причине снижения уровня когерированности режущего потока.

Главным недостатком использования абразивных добавок в технологическом плане является интенсивный износ насадки головки (*коллиматора*). Возникает необходимость частой смены коллиматоров, что увеличивает себестоимость резания. Частицы абразива не могут сразу внедриться в сверхзвуковое ядро струи, происходит их волочение по стенке отверстия трубки коллиматора. Об этом свидетельствует факт интенсивного износа внутренней поверхности коллиматора, что ограничивает его срок службы (см. рис. 1).

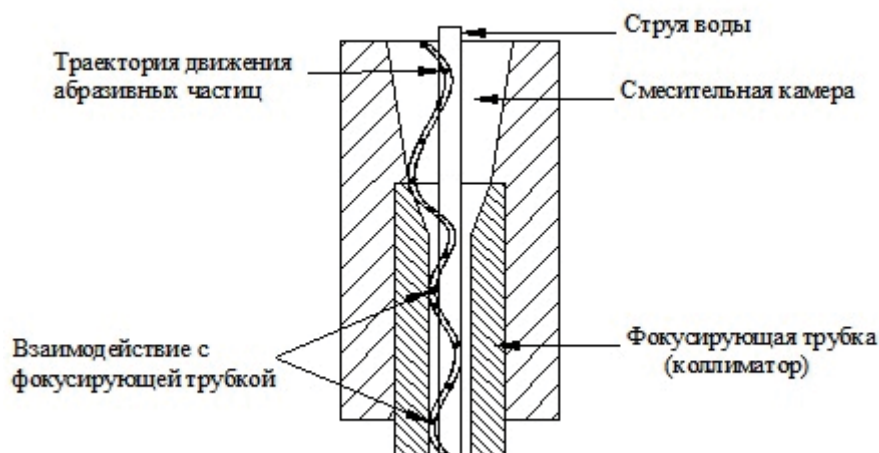


Рис. 1. Взаимодействие абразива со струей жидкости

Методы управления износом

1) Управление износом дополнительным потоком технологической жидкости.

Уменьшить износ фокусирующей трубки можно с помощью воздействия на абразивный материал. Если ввести дополнительную струю жидкости, которая будет «подхватывать» вылетевшие из основной струи абразивные частицы, можно уменьшить воздействие абразива на фокусирующую трубку. Для этого необходимо определить, какой энергией должна обладать воздействующая частица, чтобы она смогла отклонять абразивные частицы с «неправильных» траекторий (см. рис. 2).

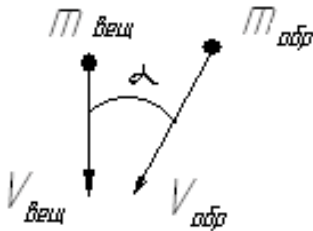


Рис. 2. Схема взаимодействия частиц:

$m_{вещ}$ – масса элементарной частицы вещества;
 $m_{абр}$ – масса элементарной частицы абразива;
 $V_{вещ}$ – скорость элементарной частицы вещества;
 $V_{абр}$ – скорость элементарной частицы абразива

Из рис. 2 видно, что максимальной энергией частица вещества должна обладать, когда взаимодействие абразива с частицей вещества происходит под углом $\alpha = 90^\circ$. Когда абразив движется параллельно стенке ($\alpha = 0^\circ$), то на нее можно не воздействовать, то есть:

$$\frac{m_{вещ} \cdot V_{вещ}^2}{2} \geq \frac{m_{абр} \cdot (V_{абр} \cdot \sin \alpha)^2}{2}.$$

Следует отметить, что скорость абразивной частицы в коллиматоре ($V_{абр}$) изменяется от минимальной в камере смешения до максимальной на выходе из фокусирующей трубки. Из этого следует, что сила воздействия на абразивные частицы в коллиматоре для устранения их контакта со стенками трубки должна увеличиваться. Для обеспечения гарантии того, что контакта частиц со стенками трубки не будет, можно принять скорость $V_{абр}$ максимальной и равной скорости течения струи.

При равных объемах элементарных частиц вещества и абразива можно записать:

$$\rho_{вещ} \cdot V_{вещ}^2 \geq \rho_{абр} \cdot V_{абр}^2 \cdot \sin^2 \alpha \quad \text{или} \quad \frac{V_{вещ}^2}{V_{абр}^2} \geq \frac{\rho_{абр}}{\rho_{вещ}} \cdot \sin^2 \alpha.$$

Решая данное неравенство путем определения $V_{вещ}$ и $V_{абр}$, получили выражение

$$\frac{16 \cdot Q_{вещ}^2}{2000 \cdot P \cdot \pi^2 \cdot (d_k^2 - d_{ст}^2)^2} \geq \frac{\rho_{абр}}{\rho_{вещ}} \cdot \sin^2 \alpha,$$

где d_k – диаметр внутренней поверхности коллиматора, м; $d_{ст}$ – диаметр струи, м; P – давление на входе в сопло МПа; $Q_{вещ}$ – расход вещества.

Если подставить заданные параметры: геометрические размеры сопла, коллиматора, плотность абразива, давление на входе в сопло, можно определить вещество, которым будем воздействовать, и его расход.

Проанализировав полученное выражение, приходим к выводу, что известными жидкостями воздействовать на абразив не представляется возможным ввиду нереальности реализации подобной подачи требуемого расхода управляющей жидкости.

2) Льдообразующие способы управления износом.

В своей работе А.С. Денисов предлагает использовать принудительное льдообразование в целях формирования на стенках коллиматора разделительной (защитной) ледяной прослойки [2]. Но результаты работы свидетельствуют о значительном росте энергозатрат в связи с техническим обеспечением скорости образования требуемой толщины ледяной прослойки на внутренней стенке коллиматора.

Существует и другой подход к решению задачи, реализуемый авторами технологии водоледорезки как разновидности ГАР. Ю.С. Степанов предлагает решение по изменению устройства РГ посредством включения элементов подачи жидкого хладагента (N_2) в смесительную камеру РГ [5]. Приведенная в работе методика расчета технологических параметров резания водоледяным инструментом свидетельствует о наличии возможности снижения рабочего давления в системе ГАР при сохранении требуемых результатов резки за счет отказа от применения абразивного элемента и замены его функций льдообразованием в напорной струе жидкости. Однако отмеченное предложение не решает проблемы износа при резке толстолистовых металлов и приемлемо лишь для тонколистовых материалов неметаллической природы.

Анализ влияния A_i

Показатель абразивного насыщения струи жидкости A_i функционально зависит от значений начальной плотности жидкости r – потока, абсорбирующего частицы абразива, и плотности режущей струи жидкости ρ , насыщенной частицами абразива. В свою очередь, от показателя A_i зависит степень когерирования режущей струи.

Рассматривая проблему формирования управляемого когерентного потока двухфазной жидкости, следует изначально указать на синергетический характер образования и поведения подобного потока по причине неопределенности динамики изменения вязкости подобной системы. За недолгое время ее существования: от изначально разрозненных потоков до объединённого двухфазного напорного истечения происходит неоднократное изменение ламинарности режима потока, что само по себе – результат объединения двух энергий движения разноплотностных сред. В данной ситуации невозможно судить об уровне однородности потока по площади его живого сечения. Распределение скоростей потока по его сечению носит явно выраженный нелинейный характер.

В пограничных областях поток испытывает турбулентность завихрений по шероховатости профиля направляющих поверхностей и при этом дополнительно – турбулентность, образующуюся вокруг внедряемых в поток частиц абразива.

Рассматриваемый процесс имеет не только неоднородность распределения энергий по сечению, но и нелинейный характер развития. Рассмотрим графическую модель процесса (см. рис. 3).

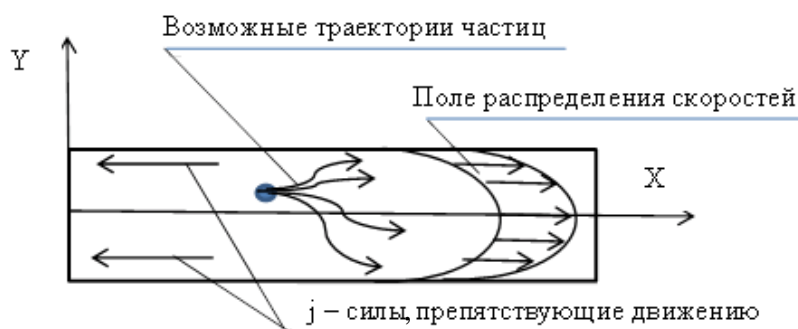


Рис. 3 Реальное состояние потока

В работе А. Сарухян [6] получены закономерности распределения мгновенных скоростей по живому сечению для общего случая, когда начальное распределение скоростей и перепад давления заданы в виде произвольных функций. Полученные закономерности позволяют вычислить коэффициенты количества движения и кинетической энергии, потери энергии при неустановившемся движении, определить закономерность изменения (деформации) профиля скоростей во времени и получить характер изменения коэффициентов количества движения β и кинетической энергии α .

Однако в работе не учтены двухфазность состояния потока, изменение вязкости и плотности во времени, присущие рассматриваемому нами случаю.

Представляется целесообразным уточнение математического аппарата, описывающего учитываемые процессы. Разработка подобной нелинейной математической модели процесса послужит объективной основой принятия конструкторско-технологических решений, направленных на устранение недостатков конструкций РГ ГАР.

Рассматриваемая система двухфазового состояния по истечению времени упорядочивается (когерентируется) на принципах самоорганизации в энергетически емкий результат – образование когерентного режущего инструмента. Процесс самоорганизации сопровождается весомыми энергетическими потерями на преодоление сил трения и придания результирующему потоку ламинарного режима истечения.

С технологической точки зрения желательным является достижение результирующего состояния потока, характеризуемого приемлемым уровнем однородности распределения количества движения и скоростей перемещения частиц абразива по живому сечению потока (см. рис. 4).



Рис. 4. Требуемый профиль скоростей

Таким образом, целью дальнейшей работы является разработка теоретически обоснованного комплекса технологических решений на внесение изменений в конструкции РГ ГАР, учитывающих использование новых конструктивных элементов, материалов и технологических жидкостных сред:

- устройство импульсной подачи хладагента и абразива в форме соосного потока;
- устройство формирования спиралеобразного когерентного потока режущей струи;
- изменение технологического материала в конструкции коллиматора;
- устройство подачи дополнительной водорастворяемой технологической жидкости, содержащей абсорбированный абразив, отличной физическими характеристиками от используемой в процессе технической воды.

Вносимые изменения направлены на увеличение рабочего ресурса РГ без замены комплектующих, снижение энергоемкости процесса резки за счет формирования высококогерентного режущего потока при меньших рабочих давлениях, с сохранением заданных параметров качества поверхности, геометрии и точности реза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ханов, В. А. Необходимость централизации управления процессами автоматизации управления в рамках крупной корпорации / В. А. Ханов, Б. Н. Марьин, Д. Н. Фролов, Н. П. Куриная, Р. В. Шпорт // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № III – 1(7). – С. 66-70.
2. Денисов, А. С. Влияние двухфазной струи на коллиматор гидроабразивной головки / А. С. Денисов // Автоматизация и информационные технологии: материалы науч-техн. конф. – М.: МГТУ «Станкин», 2010.
3. Коржов, Е. Г. Некоторые особенности водоструйной обработки материалов «Waterjet-технология» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд-во «Горная книга», 2006. – С. 373-387.
4. Полянский, С. Н. Технология и оборудование для гидроабразивной резки / С. Н. Полянский, А. С. Нестеров // Вестник машиностроения. – 2004. – № 5.
5. Методика расчета технологических параметров резания неметаллических материалов водоледяным инструментом / Ю.С. Степанов, А.Н. Качанов, М.А. Бурнашов // Ползуновский Вестник. – 2009. – № 1-2.
6. Саруханян, А. Исследование нестационарного ламинарного плоскопараллельного напорного движения / А. Саруханян, А. Манукян // Energyonline. – 2010. – №2(3).

Линёв А. С., Сарилов М. Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ПРОБОЯ В ЖИДКОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Линёв А. С., Сарилов М. Ю.

A. S. Linev, M. Y. Sarilov

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ПРОБОЯ
В ЖИДКОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

**A STUDY OF ELECTRODE BREAKDOWN PROCESSES IN DIELECTRIC FLUID IN
ORDER TO INCREASE THE PERFORMANCE OF ELECTRICAL DISCHARGE MA-
CHINING**

Линёв Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: uranus_123@mail.ru

Mr. Alexander S.Linev – PhD Candidate, Department of Chemical Production Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur. E-mail: uranus_123@mail.ru

Сарилов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sarilov@knastu.ru

Mr. Mikhail Y. Sarilov – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Chemical Production Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur. E-mail: sarilov@knastu.ru

Аннотация. В статье рассмотрены различные физические и химические явления, возникающие в процессе электроэрозионной обработки. В частности были освещены вопросы изменения работы выхода электронов с поверхности металла в жидкий диэлектрик. Приведены результаты экспериментальных исследований единичных лунок различных материалов в различных жидкостях. Особое внимание было уделено рассмотрению механизму пробоя между парой электродов, одним из которых является алюминий.

Summary. The paper deals with various physical and chemical phenomena occurring during electrical discharge machining. In particular, highlighted are the issues of changes that take place in the work function of electrons coming out of metal surface in a dielectric fluid. The results of experimental study of individual wells in different materials in different liquids are offered. A particular attention is paid to the mechanism of breakdown between a pair of electrodes, one of which is aluminum.

Ключевые слова: работа выхода, электрон, диэлектрик, алюминий, единичный разряд, напряженность.

Key words: work function, electron, dielectric, aluminum, single discharge, intensity.

УДК 621.9.048

Интенсивное использование электроэрозионной обработки (ЭЭО) в настоящее время обусловлено очень динамичным развитием как отечественного, так и мирового машиностроения. Появляются новые виды сплавов высокой твердости, которые все чаще применяются в конструкциях и потому требуют специальных эффективных методов обработки. Вместе с тем в промышленности существует постоянная тенденция к созданию и использованию более легких деталей более сложной формы. С каждым годом конструктивные формы деталей усложняются, повышаются их точность и требования к физико-механическим свойствам по-

верхностного слоя. Перед машиностроением остро стоит задача интенсификации производственных процессов изготовления продукции, при этом выпускаемая продукция должна удовлетворять самым высоким требованиям качества. Высокая гибкость и технологичность методов ЭЭО позволяет успешно решить эти задачи. Накопленный опыт применения электроэрозионной обработки (ЭЭО) в машино- и приборостроении свидетельствуют о ее конкурентоспособности по сравнению с механической обработкой резанием, что особенно проявляется при обработке труднообрабатываемых электропроводных материалов, изготовлении деталей сложной конфигурации, прошивке соединительных каналов в корпусных деталях и т.п.

Процесс пробоя, составляя основу процесса ЭЭО, изучен крайне отрывочно, что не позволяет качественно влиять в широких пределах на процесс. Изучение процессов, происходящих при пробое жидкости, как основы всего процесса, позволит управлять обработкой значительно более точно, то есть сделает эффективной.

Усовершенствование процесса электроэрозионной обработки не может происходить без исследования самого процесса пробоя в жидком диэлектрике, который используется в качестве рабочей жидкости. Зачастую описание процесса разрушения электрической прочности рабочей жидкости ведется по закономерностям, заимствованным из теории вакуумного или газового разряда, которые на данный момент считаются наиболее изученными. Однако теория, разработанная в данных разделах физики, не может быть безоговорочно перенесена на пробой жидкости ввиду ярких особенностей механизма этого явления.

Первое отличие жидкостного пробоя от газового – это разные значения работы выхода электронов из катода. Данное явление происходит из-за нескольких причин: изменение работы выхода вследствие проникновения поля в металл, влияние поверхности катода и пространственных зарядов, действие сил изображения с учетом нелинейной поляризации среды.

Работы по нелинейным эффектам в жидких диэлектриках в сверхсильных электрических полях показали, что изменение показателя преломления n в этих условиях можно описать уравнением

$$n = n_0 + kE^2, \quad (1)$$

где n_0 – показатель преломления невозмущенной жидкости, $k = B \cdot \lambda$ (B – постоянная Керра, λ – длина волны света).

Это дает возможность использовать эффект нелинейной поляризации жидкости для учета влияния электрического изображения на эмиссию из металла в жидкость. В сильных полях второе слагаемое формулы (1) близко к n_0 , что требует учета нелинейной поляризации жидкости.

Известно, что работу выхода W из металла в жидкость с диэлектрической проницаемостью ϵ можно записать как

$$W = W_0 \cdot \epsilon^{-1}, \quad (2)$$

где W_0 – работа выхода электронов из металла в вакуум; $\epsilon = n^2$. Выражение для силы электрического изображения $F(x)$ запишем в виде

$$F = -\frac{e^2}{4x^2(n_0 + kE^2)^2}. \quad (3)$$

Приведем уравнение (3) к виду, удобному для дальнейших расчетов:

$$Z(1 + Z^2)^2 = -\frac{b}{x^2}, \quad (4)$$

где

$$Z = \frac{F}{e} \cdot \sqrt{\frac{k}{n_0}}, \quad b = \frac{e}{4n_0^2} \sqrt{\frac{k}{n_0}}. \quad (5)$$

Анализ левой части уравнения (4) при реальных значениях k , n , W_0 показывает, что $Z < 1$. При этом уравнение (4) можно приближенно записать в виде

$$Z \cong \sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{sh} \frac{1}{3} \left(\operatorname{arsh} 3 \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{b}{x^2} \right). \quad (6)$$

Работу выхода из металла в жидкость с учетом нелинейной поляризации среды запишем как

$$W_1 = \int_{x_0}^{\infty} F \cdot dx = F \cdot x|_{x_0}^{\infty} - \int_{x_0}^{\infty} x \cdot dF. \quad (7)$$

где

$$x_0 = \frac{300 \cdot e^2}{4W_0}. \quad (8)$$

Из формулы (4) выражение для x подставим в уравнение (7) и получим

$$W_1 = -F_0 x_0 + \sqrt{\frac{n_0}{k}} e^2 b \cdot \int_{z_0}^{\infty} \frac{d|z|}{\sqrt{|z|(1+|z|^2)}}. \quad (9)$$

После интегрирования (9) и с учетом (6) и (8) выразим z_0 в виде

$$z_0 = -\sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{sh} \frac{1}{3} \left[\operatorname{arsh} \cdot 3.4 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{k}{n_0}} \left(\frac{W_0}{n_0} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

Формула (10) позволяет рассчитать работу выхода для конкретных систем металл – жидкий диэлектрик. По результатам расчета видно, что уменьшение работы выхода электронов из металла в жидкость вследствие нелинейного изменения ε жидкости в поле электрона и его изображения тем больше, чем больше работа выхода из металла в вакуум и постоянная Керра.

Значения работы выхода электронов в условиях опыта могут существенно отличаться от истинных фотоэлектрических величин для данного металла катода. В результате механической полировки и последующего пребывания на воздухе на поверхности электродов образуется окисная пленка, а при помещении их в углеводородные жидкости еще и диэлектрическая пленка из воскообразных продуктов разложения жидкости. Эта пленка изменяет потенциальный барьер (см. рис. 1).

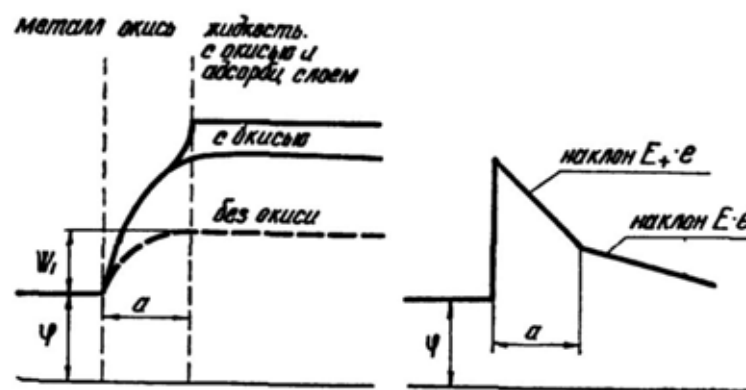


Рис. 1. Изменение потенциального барьера под действием окисного слоя адсорбционного слоя на окиси

В определенных условиях окисная пленка на катоде может вызывать и обратный эффект. Положительные ионы, образующиеся в жидкости, оседая на поверхности окисной пленки, создают поверхностно заряженные слои. Увеличивая напряженности поля у катода, эти слои повышают интенсивность электронной эмиссии и ток проводимости в сильных полях [1].

Для жидкостей с большой ϵ при импульсном воздействии напряжения, когда средняя напряженность поля в промежутке $E_{cp} \sim 10^6$ В/см, поле у поверхности металла может достигать $\sim 10^8$ В/см вследствие непрерывности нормальной составляющей электрической индукции ($E_0 = D = \epsilon E_{cp}$) и усиления поля на микроостриях катода. Для корректного учета эффекта проникновения поля в металл при полях $\sim 10^8$ В/см необходимо обосновать применимость уравнения

$$\Delta e\varphi = \frac{eE_0}{\chi} \cdot e^{-\chi x},$$

где $\Delta e\varphi$ – изменение уровня Ферми при наличии поля у поверхности металла; $E_0 = \epsilon E_{cp}$; χ – константа экранирования Томаса-Ферми.

Проникновение поля в металл изменяет энергию электронов на уровне Ферми следующим образом:

$$e\varphi_i(E) = -e\varphi_i(0) + \Delta e\varphi_0,$$

где $e\varphi_i(E)$ и $e\varphi_i(0)$ – энергии электронов на уровне Ферми при наличии поля и без него соответственно; $\Delta e\varphi_0$ – значение $\Delta e\varphi$ при $\chi = 0$.

Тогда работу выхода электронов из металла в жидкость при наличии внешнего поля можно записать

$$W'_0 = -W_0 + \Delta e\varphi_0 = -W_0 + e\epsilon E_{ch} \cdot \chi^{-1}.$$

По результатам экспериментов для полярных жидкостей снижение работы выхода электронов из металла вследствие проникновения поля становится существенным уже при полях $\sim 10^4$ В/см.

Эмиссия электронов с катода – стартовый этап пробоя жидкости, от которого, бесспорно, во многом зависит дальнейшее протекание разряда через межэлектродный промежуток, а потому весьма важно иметь уравнения, способные описать этот процесс.

Следующей рассмотренной особенностью импульсного пробоя в жидкости станет влияние материалов электродов на электрическую прочность среды. Вследствие взрывного разрушения электродов и поступления их материала в плазму развивающегося разряда следует ожидать существования связи электрической прочности жидкостей в коротких промежутках (какие и присущи ЭЭО) с термодинамическими характеристиками материала электродов; в условиях однородного поля – со свойствами материала анода.

Как правило, газообразование является результатом одновременного воздействия электрических, тепловых и механических факторов, присутствующих в процессе обработки. Во всех случаях газообразование связано с химическими изменениями.

Известно, что разрушение жидкости при искровых разрядах и её дальнейшие химические превращения протекают в результате теплового воздействия, бомбардировки заряженными частицами, воздействия излучения и ударных волн. Часть этой энергии тратится на образование и поддержание канала разряда, на разогрев жидкости или газа, на возбуждение атомов жидкости или газа, на разрыв химических связей и фрагментацию молекул, на ионизацию атомов, молекул и фрагментов. Очевидно, что степень воздействия разряда на жидкость зависит от условий развития разряда. Так, при искровом разряде в газовом промежутке до 25 % энергии тратится на излучение, 3 – 4 % – на ионизацию и 6 – 8 % – бомбардировку, около 30 % на формирование канала. В то же время при разряде в жидкости на излучение тратится порядка 0,1 % всей энергии разряда. Можно предполагать, что в жидкости затраты на бомбардировку и ионизацию возрастают, но основные затраты при этом приходятся на поддержание канала разряда.

Электрическое воздействие на изоляционную (рабочую) жидкость порождает химические реакции одновременно в двух фазах: в жидкости и в плазме. Химические процессы в плазменной и в жидкой фазах существенно отличаются друг от друга: в жидкой фазе развивается цепной радикальный процесс, а в газовой фазе – плазмохимический, характеризующийся первоначальной фрагментацией и последующей рекомбинацией образованных фрагментов.

Характер принудительного, энергичного воздействия электрическим разрядом принципиально отличается от характера воздействия тепловой энергии. Тепловая энергия (энергия колебания молекул и атомов) находит слабые места в молекуле. Если случайно сложившийся максимум энергии совпадает со случайно подвергшейся деформации связью в молекуле, то происходит ее разрыв. Вероятность такого события при нормальной температуре ничтожно мала. Здесь можно рассчитывать в большей степени на то, что распаду будут подвергаться наименее прочные связи (С – С, 346 кДж/моль) и в центральной части молекулы, а не в концевом звене – СН₃. Но и при этом водород является преимущественным газом, а не исключительно только более мелкие органические фрагменты. Это свидетельствует о том, что даже мягкое тепловое воздействие после разрыва связи С – С ведет к глубокому потрясению молекулы как ангармонического осциллятора, сопровождающемуся отщеплением атома водорода с образованием неопределенной связи.

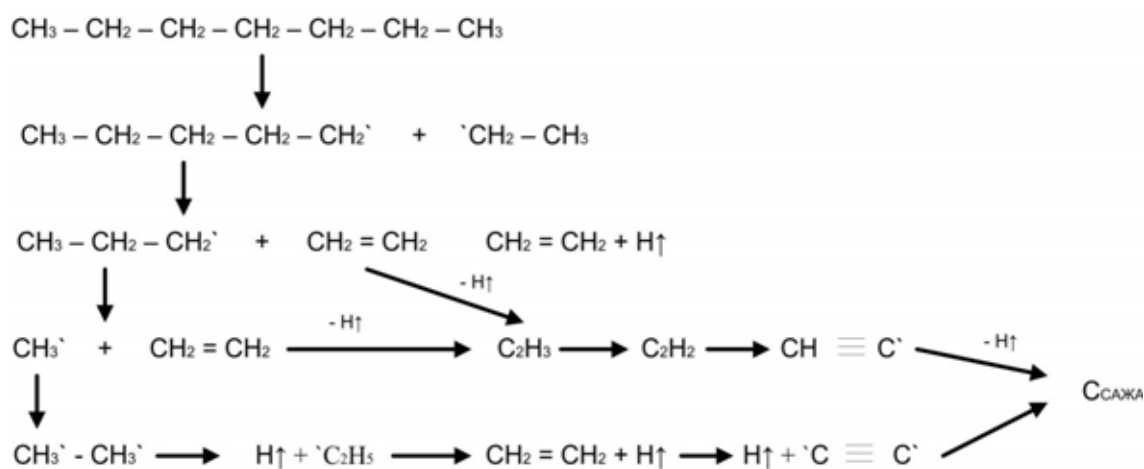


Рис. 2. Механизм разложения жидкости

Водород является преобладающим продуктом и в плазменном процессе (см. рис. 2). Конечным итогом плазмохимической реакции являются водород и сажа. Таким же образом протекают реакции разложения циклопарафинов и ароматики – различаются только начальные стадии: разрыв бензольного кольца приводит непосредственно к образованию ацетилена, а деструкция нафтеновых углеводородов начинается с раскрытия цикла.

Исследования теории искрового пробоя проводились на основе единичного импульса, получаемого на экспериментальной установке, схема которого приведена на рис. 3.

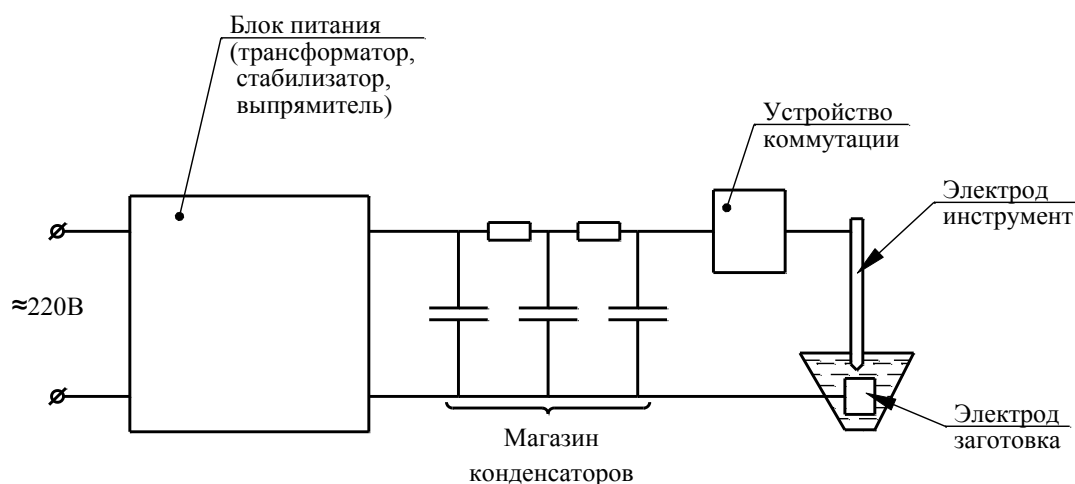


Рис. 3. Принципиальная схема стенда

Обработка экспериментальных исследований производилась на оптическом микроскопе «Micro Planer-200», который позволяет исследовать геометрические параметры лунки после пробоя. По результатам анализа геометрических параметров лунок были построены графики зависимости площади лунки от энергии единичного импульса (см. рис. 4 – 6).

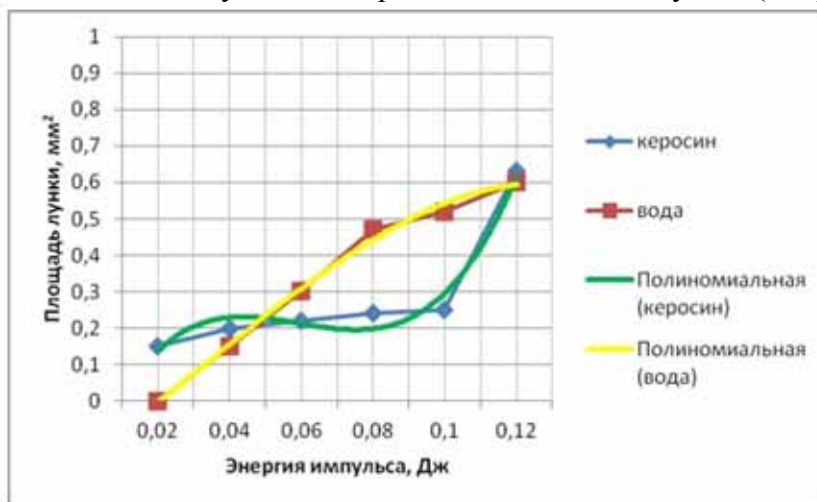


Рис. 4. Зависимость площади лунки на стали 45 от энергии импульса

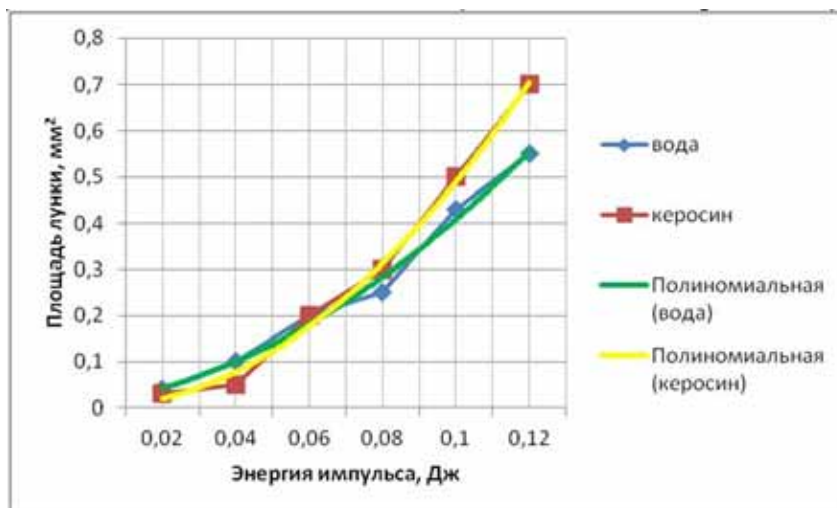


Рис. 5. Зависимость площади лунки на титановом сплаве ОТ-4 от энергии импульса

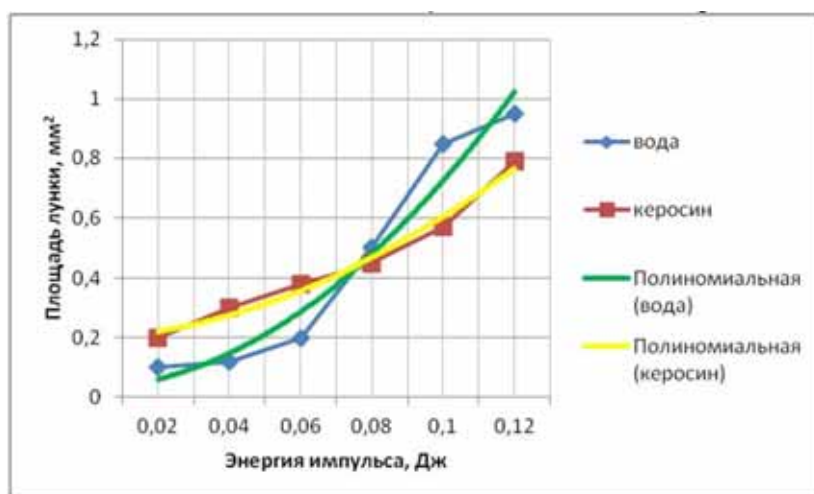


Рис. 6. Зависимость площади лунки на алюминиевом сплаве АК-4 от энергии импульса

Линёв А. С., Сариков М. Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ПРОБОЯ В ЖИДКОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

На основании полученных результатов был сделан вывод о нелинейной зависимости площади лунки (а значит и диаметра плазменного канала) от энергии импульса. Были косвенно подтверждены теоретические исследования о влиянии материалов электродов и газообразования на процесс искрового пробоя диэлектрической жидкой среды.

Так же были исследованы некоторые особенности обработки алюминия электрической эрозией. Алюминий и его сплавы, как правило, не являются традиционными материалами для электроискровой обработки. Это связано с тем, что алюминиевые сплавы имеют небольшую твердость и прочность и достаточно хорошо обрабатываются резанием [2].

Однако современные условия машиностроения заставляют конструировать и изготавливать детали очень сложной конфигурации. Такое положение дел характерно, как правило, для авиационно-космической промышленности, а также для прогрессивного автомобилестроения. Обработка таких деталей резанием либо затруднена, либо невозможна в принципе. Оправдано использование электроэрозионного способа получения деталей. Именно поэтому на сегодняшний день существует задача по совершенствованию технологии обработки таких материалов с помощью электрической эрозии.

Обработка алюминиевых сплавов имеет свои яркие особенности. Проводились исследования тепловых явлений при обработке трех видов материалов: стали 45, титанового сплава ОТ-4, алюминиевого сплава АК-4. Результатами исследований стали выводы о факторах, влияющих на изменение температуры в процессе электроэрозионной обработки, и экспериментальные закономерности, полученные в результате обработки вышеназванных материалов (см. рис. 7 – 8).

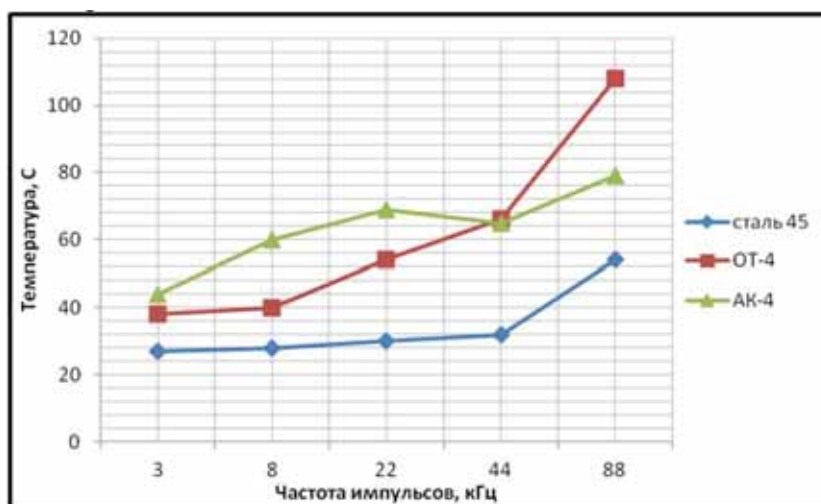


Рис. 7. Зависимость температуры от изменения частоты импульсов

Как видно из приведенных рисунков, ситуация с концентрацией тепловой энергии в алюминиевом сплаве схожа с титановым сплавом, а подчас даже несколько больше. Это весьма парадоксальное явление ввиду того, что коэффициент удельной теплопроводности у алюминия на порядок больше, чем у титана, и почти в 3 раза больше, чем у стали.

Ко всему прочему у алюминиевого сплава очень высокий коэффициент удельной теплоемкости, который свидетельствует о том количестве тепловой энергии, которое нужно сообщить одному грамму (килограмму) для того, чтобы он изменил свою температуру на один градус Цельсия (Кельвина). Все это свидетельствует о том, что процесс пробоя на алюминий и его сплавы имеет свои характерные особенности, вызывающие концентрацию тепловой энергии в зоне обработки. Логично предположить, что данный факт вызван влиянием материала электрода на процесс пробоя.

Вследствие взрывного разрушения электродов и поступления их материала в плазму развивающегося разряда следует ожидать существования связи электрической прочности жид-

костей в коротких промежутках (какие и присущи ЭЭО) с термодинамическими характеристиками материала электродов; в условиях однородного поля – со свойствами материала анода.

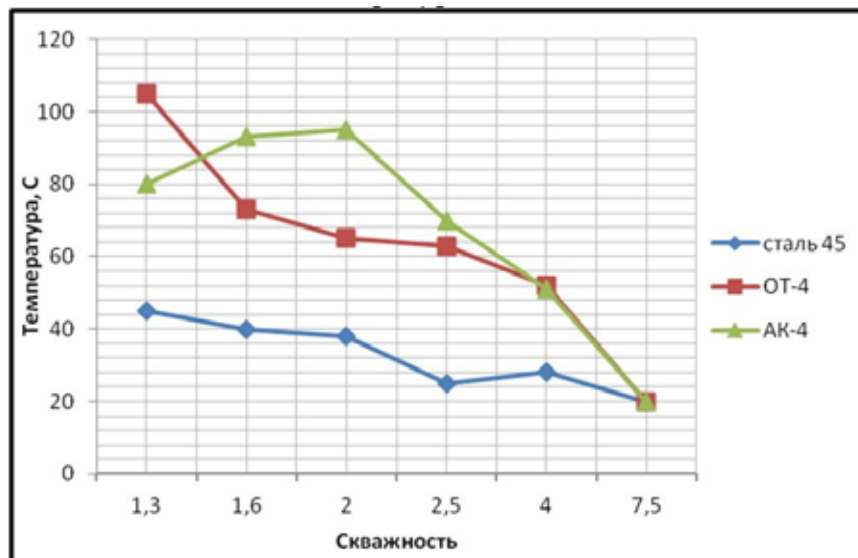


Рис. 8. Зависимость температуры от изменения скважности

С целью проверки этого предположения и оценки роли взрывного разрушения электродов в импульсном пробое жидкостей выполнены измерения импульсной электрической прочности очищенной воды ($\rho = 10^4$ Ом·см) и гексана при различных материалах электродов. Полусферические электроды диаметром 0,2 см изготавливались из нержавеющей стали, молибдена, алюминия, меди и свинца. Длина разрядного промежутка в воде составляла $2,92 \cdot 10^{-2}$ см, в гексане – $1,9 \cdot 10^{-2}$ см. Измерения выполнены на прямоугольном импульсе с фронтом $t_f = 10$ нс. Время разряда в каждом случае поддерживалось примерно постоянным и равным 500 нс. Для каждой пары электродов выполнено 30 измерений. Электроды заменялись через 10 пробоев. Для электродов из различных материалов режим полирования и время между окончанием полирования и измерениями обеспечивались неизменными ($t \approx 5$ мин).

Из полученных результатов следует, что

- 1) основное влияние на электрическую прочность жидкости оказывает материал анода;
- 2) изменение в широких пределах термодинамических свойств материала электродов незначительно изменяет электрическую прочность жидкостей;
- 3) существует тенденция к уменьшению электрической прочности жидкостей при уменьшении теплоты сублимации и испарения материала анода.

Таким образом, результаты исследования влияния материала электродов на импульсную электрическую прочность жидкостей подтверждают тепловую природу разрушения электродов и указывают на важную роль в пробое продуктов разрушения, поступающих в плазму развивающегося разряда. Можно предположить, что пары и макрочастицы металла электрода, имеющие малые, по сравнению с жидкостью, потенциалы ионизации (5 – 8 эВ), ионизируются в плазме разряда и тем самым увеличивают ее проводимость и облегчают пробой.

Однако выведенные зависимости не распространяются на алюминий. Наиболее вероятной причиной этой аномалии является искажение поля в промежутке «усами», образующимися из окисной пленки при разрушении ее во время разряда (см. рис. 9). Анализ состояния электродов в процессе измерений показывает, что на алюминиевых электродах последующие разряды осуществляются с кромок кратера, образующегося от первого пробоя. Образование кратеров на электродах из других материалов не вызывает образования «усов» и практически каждый последующий пробой происходит с нового участка поверхности электродов. Это явление наблюдалось во всех экспериментах в условиях однородного или слабо неоднородного поля.

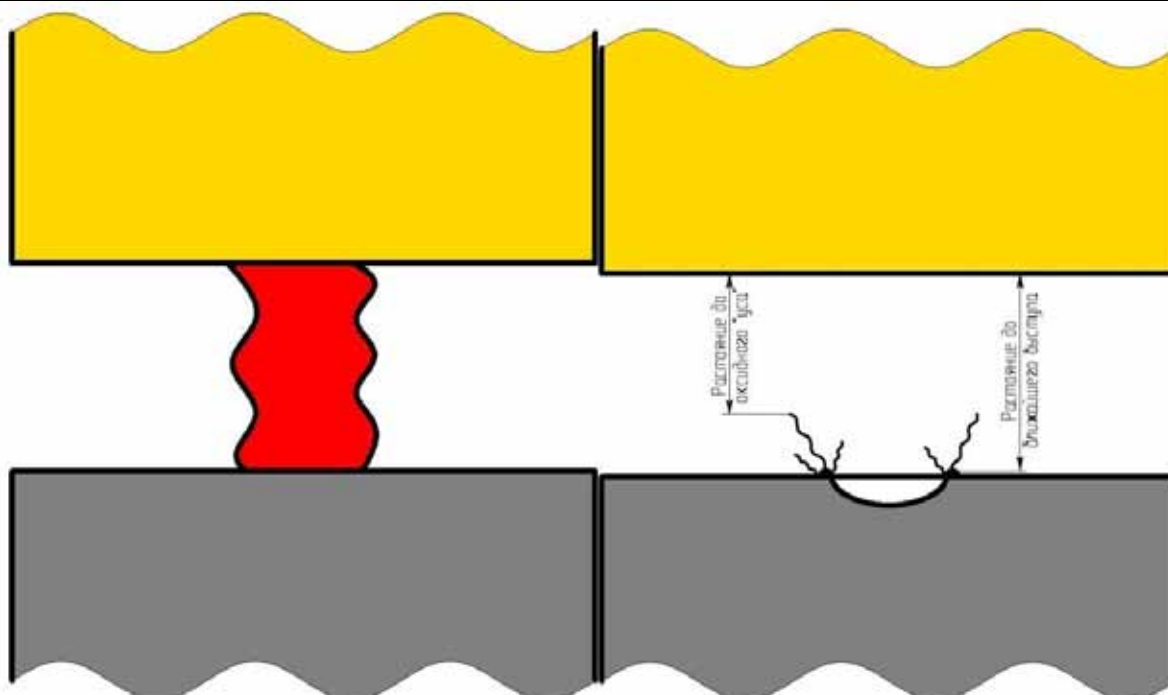


Рис. 9. Упрощенное представление пробоя на алюминиевый сплав

Так как расстояние между электродами сокращается за счет оксидных образований на аноде из алюминиевого сплава, последующий пробой происходит недалеко от первой лунки. Как следствие, количество холостых импульсов сокращается до минимума, и количество энергии, в том числе и тепловой, выделившейся при обработке, растет.

Результаты работы:

1. Теоретически описан эффект снижения работы выхода электрона с поверхности металла в жидкую среду в связи с проникновением поля в металл, образованием оксидной пленки на поверхности электродов, нелинейной поляризацией жидкости и обоснована важность влияния этого явления на процесс искрового пробоя.

2. Теоретически обоснована важность влияния процесса газообразования на процесс пробоя жидкой среды, особенно на случаи, когда происходит тепловой механизм пробоя жидкого диэлектрика. Предложена методика расчета объема газообразования в процессе химического разложения жидкости.

3. Описано влияние материалов электродов на диэлектрическую проницаемость жидких диэлектриков, а значит и на процесс пробоя.

4. Теоретически и экспериментально обоснованы особенности обработки алюминиевых сплавов методом электроэрозионной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение искусственных нейронных сетей в системах управления электроэрозионной обработки / А. С. Линёв, М. Ю. Сариллов, С. В. Биленко, В. В. Алтухова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № II-1(2). – С. 69-75.

2. Роль плазменного канала и механизмы теплопередачи в процессе электроискровой обработки / А. С. Линёв, М. Ю. Сариллов, А. М. Злыгостев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № II-1(6). – С. 57-63.



Медведев А. М., Литовка Г. В.
A. M. Medvedev, G. V. Litovka

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ
РЕДУКТОРНЫХ СИСТЕМ СТАНКОВ**

**DESIGNING THE ARCHITECTURE OF METAL CUTTING MACHINES' GEAR
SYSTEMS WITH ACOUSTICALLY OPTIMAL PARAMETERS**

Медведев Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры дизайна Амурского государственного университета (Россия, Благовещенск); Амурская обл., г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, д. 21. E-mail: design@amursu.ru.

Mr. Alexander M. Medvedev – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Design, State Amur University, Russia, the Amur region, city of Blagoveshchensk, 21 Ignatyevskoye Highway. E-mail: design@amursu.ru.

Литовка Геннадий Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общей математики и информатики Амурского государственного университета (Россия, Благовещенск); Амурская обл., г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, д. 21. E-mail: litovka44@mail.ru.

Mr. Gennady V. Litovka – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of General Mathematics and Computing, State Amur University, Russia, the Amur region, city of Blagoveshchensk, 21 Ignatyevskoye Highway. E-mail: litovka44@mail.ru.

Аннотация. Выполнены исследования шумового режима металлорежущих станков в широком спектре возмущающих нагрузок. Применение универсальных методов локализации источников виброакустической активности станков позволило выявить механизмы генерации и излучения шума конструктивными элементами машиностроительного оборудования. Установлено, что станки, имеющие сложные кинематические и конструктивные особенности, содержат несколько источников акустической энергии – корпусные элементы коробок скоростей, станины и ограждающие конструкции. Снижение шума реализовано за счет уменьшения звуковой и колебательной энергии в зубчатом зацеплении в результате использования составных зубчатых колес.

Summary. The paper studies the noise modes of metal-cutting machines in a wide range of disturbing loads. The application of universal methods of localization of the sources of vibro-acoustic work of machines allowed us to reveal the mechanisms of generation and emission of noise by structural elements of engineering equipment. It is established that machines with intricate kinematic and design features contain more than one source of acoustic energy: the case elements of the transmission gear, the bed frame and protective elements. A decrease in noise is attained due to the reduction of the sound/oscillatory energy in the toothed gearing thanks to the use of composite cogwheels.

Ключевые слова: редукторные системы станков, шум, генераторы и излучатели, составные зубчатые колеса.

Key words: gear systems of machines, noise, generators and emitters, composite cogwheels.

УДК 621.01

Введение. Для современной экономики развитых стран характерен высокий удельный вес машиностроительного производства, которое является основным исходным звеном в создании различных машин и механизмов. В то же время оно является одним из травмоопасных среди основных отраслей промышленности. Основные причины этого – наличие ряда неблагоприятных факторов среды, особенно шумов и вибраций оборудования. Актуальность проблемы снижения шума и вибрации связана с тем, что шум является одним из главных

комплексных показателей качества оборудования, кроме того, длительное пребывание человека в условиях повышенного шума приводит к расстройству нервной системы и другим заболеваниям, снижению производительности труда. Проблема проектирования малошумных машин и оборудования является достаточно сложной и многоплановой.

Постановка задачи. Одним из основных источников шума в технологическом оборудовании являются приводные зубчатые механизмы, которые находятся в непосредственной близости от оператора, оказывая негативное влияние на него. Обычно они не укладываются в допустимые нормы. Одним из источников шума и вибрации в самих коробках передач являются зубчатые колеса, работа которых из-за ошибки зацепления, определяемой точностью изготовления и сборки колес в узле, сопровождается ударом. Наличие большого числа зубчатых пар и других источников шума в коробках передач осложняет решение проблемы снижения шума и вибрации оборудования.

Эффективными способами обеспечения качества работы станочного оборудования являются оптимизация виброакустических параметров на этапе синтеза или проектирования, применение шумопонижающих систем и конструкций на ранних стадиях проектирования и при эксплуатации, диагностика и мониторинг технического состояния станков.

В этой связи были поставлены задачи: 1) исследование шумового режима механических приводов металлорежущих станков в широком спектре возмущающих нагрузок и сравнение его с санитарными нормами; 2) анализ и применение универсальных методов локализации источников виброакустической активности станков, использующих единство природы шума и вибрации и их частотное соответствие; 3) разработка рекомендаций по использованию устройств с пониженными уровнями шума и вибрации металлорежущих станков на ранних стадиях проектирования.

Локализация генераторов и излучателей. Анализ результатов исследований шумового режима на предприятиях машиностроительной отрасли [1 – 4] позволяет заключить, что шум на рабочих местах в основных производствах в ряде случаев превышает гигиенические нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96 в области средних и высоких частот, является постоянным, широкополосным, с равномерным распределением уровней по всем полосам частот (колебания уровней не превосходят 10 – 15 дБ для всего спектра). Частотные спектры являются практически сплошными, однако почти на каждом из них можно выделить группы интенсивных составляющих – зубцовые частоты и их высшие гармоники, частоты, определяемые кинематическими погрешностями делительных пар зубофрезерных станков и т.п. Анализ спектров уровней вибрации является практически сплошным, на фоне которого имеются дискретные составляющие. На средних и высоких частотах уровень вибрации в области подшипниковых опор зубчатых передач менее уровня воздушного шума на 6 – 14 дБ.

Машиностроительные производства могут быть подразделены на три класса: высокошумные (превышение гигиенических норм более 10 дБ), среднешумные (превышение норм – 5 – 12 дБ) и малошумные (без превышения норм или с их превышением в пределах 5 дБ). Превышение гигиенических норм в спектрах шума наблюдается на частотах выше 500 Гц, т.е. главным образом в средне- и высокочастотной области спектра. Сравнение шумовых характеристик отечественных машин с зарубежными (по литературным данным и полученным прямым измерением) позволяет заключить, что шумовые характеристики серийного оборудования в настоящее время в целом равнозначны [2, 3]. Большинство машин высокошумные.

Методология исследований. Современные технологические машины, предназначенные для обработки металлов резанием, представляют собой жесткую металлическую конструкцию, на которой смонтированы рабочие органы и их приводы. Отдельные механизмы (а иногда и весь станок) имеют ограждения, выполняющие защитные функции. На некоторых станках имеются встроенные пневмо- и гидросистемы технологического назначения. Во время работы возникают механические и аэродинамические шумы. В частности, низкочастотные механические шумы порождаются вибрациями деталей станин, ограждений, рабо-

чих органов и приводов, вызванными инерционными силами подвижных элементов и рабочими нагрузками. Высокочастотные механические шумы и порождающие их вибрации вызываются ударами в подвижных соединениях деталей приводов рабочих органов при наличии зазоров, динамическими нагрузками циклического характера в зубчатых зацеплениях и подшипниковых узлах, а также силами трения. Низкочастотные аэродинамические шумы возникают при работе быстровращающихся рабочих органов и вентиляторов встроенных пневмосистем, а высокочастотные – при обработке резанием.

В основе методики определения источников акустической энергии в металлорежущем станке – представление о сложной взаимосвязи потоков акустической энергии, вызывающих шум. Шум на рабочем месте, определяемый общей мощностью звукоизлучения P , равен сумме потоков звуковой энергии различной природы.

Блок-схема классификации методов локализации источников виброакустической активности металлорежущих станков приведена на рис. 1.

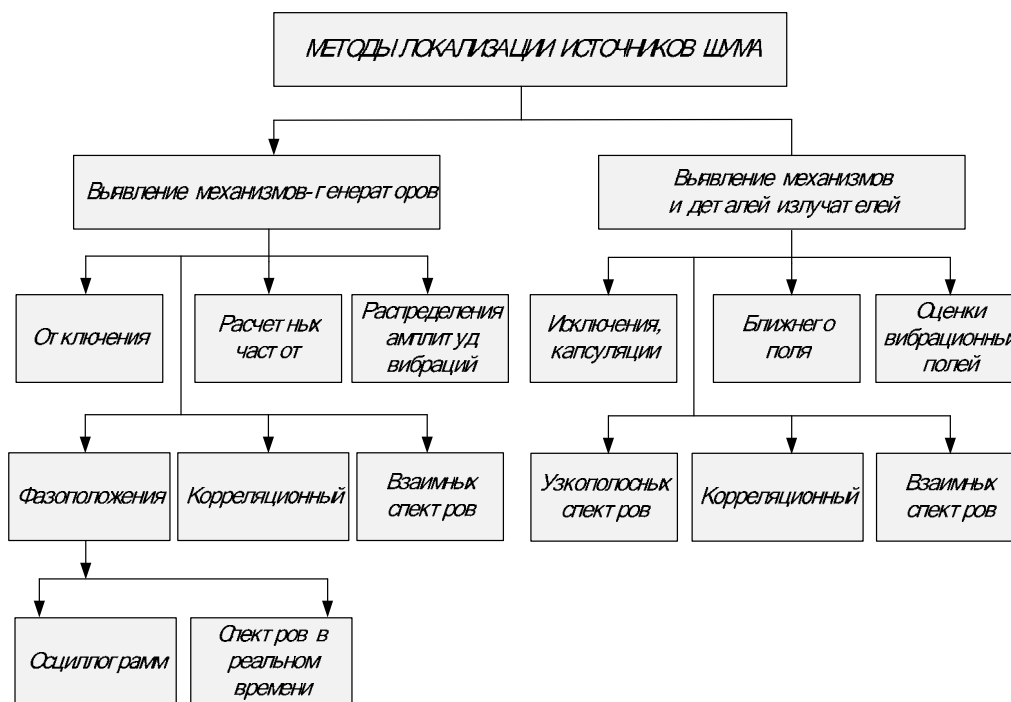


Рис. 1. Классификация методов локализации источников шума в металлорежущих станках

Из приведенной блок-схемы (см. рис. 1) следует, что применение этих методов предполагает их взаимодополняющее сочетание на двух этапах исследования. I этап – получение обобщенной информации об источниках с использованием универсальной акустической аппаратуры. Исследование проводилось в производственных условиях. II этап – уточнение полученной на предыдущем этапе информации о вкладе в общее изучение акустической энергии, частотного состава энергии источника, фазы механизмов циклического действия в момент максимального акустического излучения энергии; параметров ударных импульсов.

Высокочастотные вибрации и шум металлорежущих станков, вызванные динамическими процессами в рабочих органах и передачах, имеют случайный характер, и при работе в стационарном режиме их следует рассматривать как случайный стационарный процесс с эргодическим свойством. Стационарность предполагает однородность протекания процесса по времени, инвариантность статистических характеристик по отношению к временному сдвигу. При этом для решения практических задач достаточно слабой стационарности, необходимым и достаточным условием которой является инвариантность корреляционной функции $R(\tau)$ к временному сдвигу τ . Это условие всегда выполняется. Эргодическое свойство

стационарного процесса предполагает совпадение статистических характеристик, полученных усреднением на ансамбле реализаций, с характеристиками, полученными при усреднении во времени одной реализации. Свойство эргодичности принимается без специальных проверок, поскольку технические процессы им всегда обладают [5, 6].

Металлорежущее оборудование содержит несколько независимых источников акустической энергии, т.е. механизмы, в зоне расположения которых вибрации деталей с высокой степенью приближения можно считать статистически независимыми.

Из приведенной выше классификации методов локализации источников шума наиболее удобны в производственных условиях методы отключения, исключения излучателей (при наличии интенсивных локальных излучателей), ближнего поля (при наличии пространственного и частотного их разделения в большинстве станков). Из лабораторных перспективными являются корреляционный метод и метод взаимных спектров. Они позволяют точно определить энергетический вклад источника в общее звукоизлучение или в вибрационный поток на рассматриваемой детали-излучателе в полосе частот.

Метод отключения позволяет определить ориентировочно вклад отдельных механизмов в акустическое излучение в порядке убывания их шумности. Конструктивные особенности металлорежущих станков делают этот метод наиболее пригодным для целей локализации акустически активных механизмов в производственных условиях, так как механизмы с повышенными виброакустическими характеристиками имеют отдельные приводы. Результаты исследования проиллюстрированы обобщенными спектрограммами уровней шума механизмов, как это показано на рис. 2.

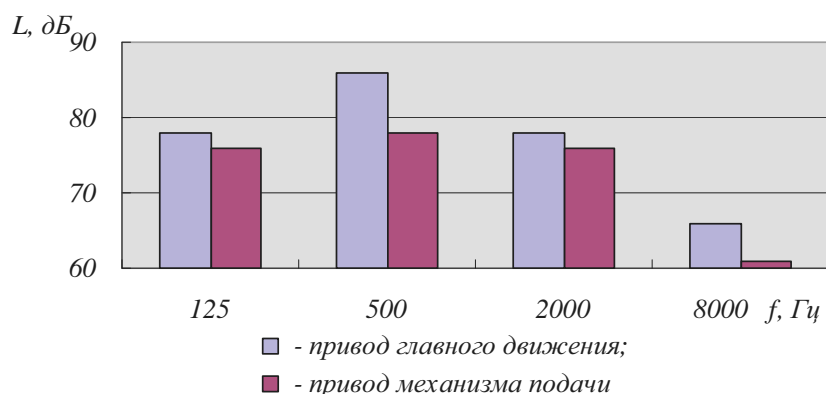


Рис. 2. Спектр уровня звукового давления механизмов горизонтально-фрезерного станка мод. 6М82

Метод расчетных частот позволяет выявить механизмы-генераторы и детали-излучатели акустической энергии и установить частотный диапазон их акустической активности по узкополосным спектрам уровней звукового давления (УЗД) с постоянной шириной полосы анализа $\Delta f \leq 100$ Гц. Устанавливается совпадение частот максимумов в узкополосном спектре УЗД с частотами возмущающих нагрузок механизмов-генераторов и собственными частотами колебаний деталей-излучателей (для которых также имеются узкополосные спектры вибрации). Это показано на рис. 3 для привода токарно-винторезного станка мод. 16К20, где область возмущающих нагрузок I – от механизмов размещена в частотном диапазоне 10 – 70 Гц, а область II – собственных частот деталей лежит в частотном диапазоне 70 – 5000 Гц.

Метод ближнего поля применим для определения положения интенсивных излучателей шума на станке при исследовании в производственных условиях. По результатам измерений УЗД на линиях, расположенных на расстоянии 0,1 м от наружных поверхностей станка, построим диаграммы изобар УЗД в плоскостях измерений, откуда видно расположение основных излучателей шума.

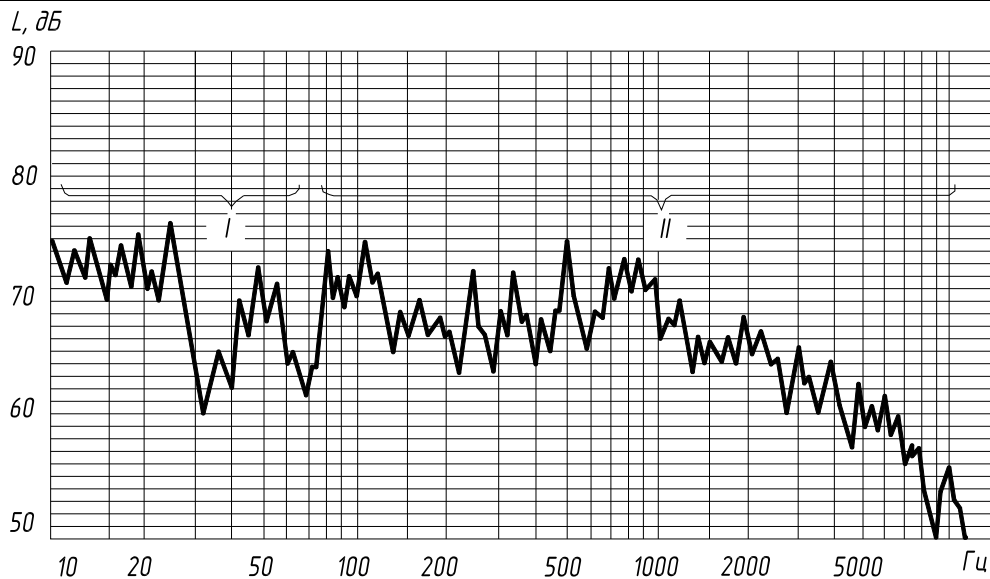


Рис. 3. Узкополосный спектр привода токарно-винторезного станка мод. 16К20 ($\Delta f = 10$ Гц)

На рис. 4 отражены зоны повышенных уровней, которые, как видим, располагаются в приводе токарно-винторезного станка мод. 16К20 (на частоте 0,25 кГц, 1 кГц и уровне звука А).

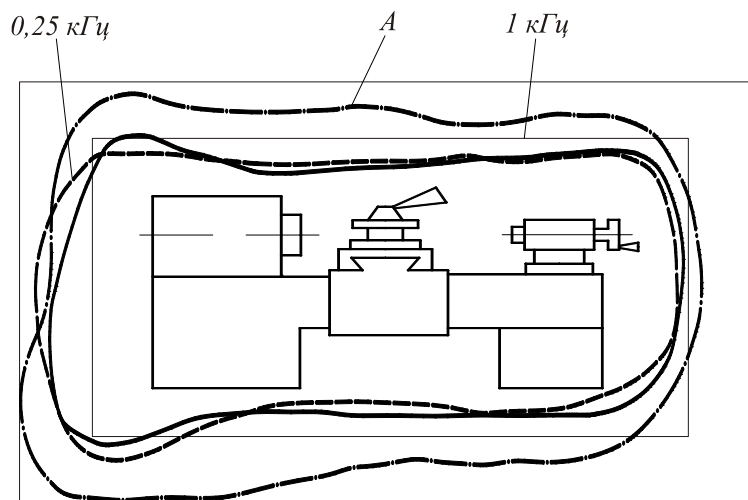


Рис. 4. Диаграмма уровней шума токарно-винторезного станка мод.16К20

В работе рассмотрен метод фазоположения, позволяющий определить положение деталей механизма циклического действия в момент наибольшего их вклада в излучение. При этом возможна и энергетическая оценка источника шума. По этому методу после определения для исследуемого механизма фазы ударного импульса производится спектральный анализ. Осциллографирование ударных импульсов выполнено на осциллографах с запоминанием и цифровых анализаторах в реальном времени (оборудованных специализированным программным обеспечением). Частотный анализ импульсов выполнен на узкополосных анализаторах в реальном времени. Осциллограмма длительности импульса τ и спектр виброускорений ударного импульса последовательности с периодом t_0 горизонтально-фрезерного станка мод. 6М82 приведены соответственно на рис. 5 и 6.

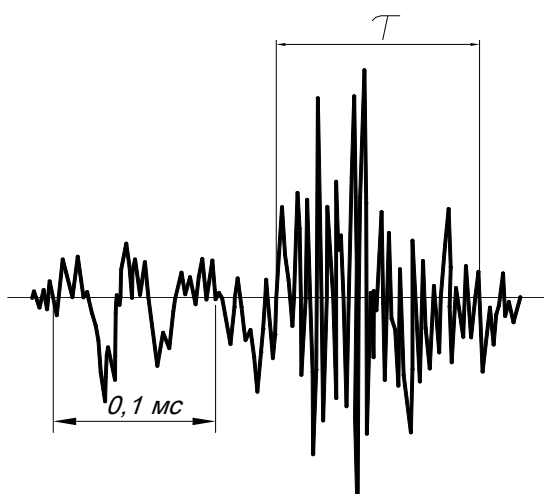


Рис. 5. Осциллограмма длительности импульса

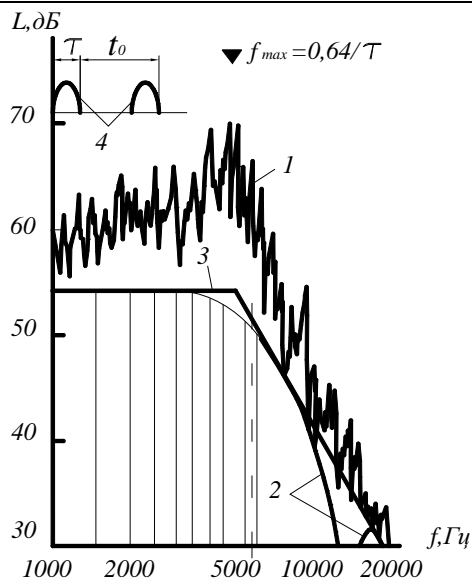


Рис. 6. Спектр виброускорений ударного импульса горизонтально-фрезерного станка: 1 – экспериментальный мгновенный спектр ($\Delta f = 25$ Гц); 2 – теоретическая спектральная плотность последовательности полусинусоидальных ударных импульсов; 3 – ее огибающая; 4 – последовательность ударных импульсов

Спектр ударных импульсов определяется их видом. Для механических приводов станков он близок к полусинусоидальному [6]. Согласно диффузионно-энергетической теории частота начала спада соответствует максимуму в спектрах шума и виброускорений:

$$f_{\max} = \frac{0,64}{\tau} \tag{1}$$

Положение максимума в мгновенном спектре уровней шума и виброускорений в зоне удара позволяет определить длительность соударения τ .

Корреляционный метод применялся для определения вклада в общее излучение генераторов и излучателей акустической энергии. Он дает наилучшие результаты на низких и средних частотах. При этом выполняется одновременная запись на многоканальный измерительный магнитофон звукового и вибрационного процессов в зоне расположения узла, вибрационных процессов на исследуемой детали и звукового процесса в рабочей зоне станка. После обработки записи на корреляторе или специализированном анализаторе устанавливаются величины нормированных взаимных корреляционных функций $r_{xy}(\tau)$ в исследуемой частотной полосе для выявленного основного канала возбуждения в полосе частот Δf [7].

Коэффициент корреляции между входным $x(t)$ и выходным $y(t)$ сигналами (нормированная функция взаимной корреляции) за время наблюдения T равен

$$r_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{x(t)y(t+\tau)}{[(x^2(t) + y^2(t))]^{\frac{1}{2}}} \leq 1, \tag{2}$$

где $R_{xy}(\tau)$ – функция взаимной корреляции процессов $x(t)$ и $y(t)$; σ_x^2 , σ_y^2 – дисперсии соответственно процессов $x(t)$, $y(t)$; τ – шаг корреляции, с.

Дисперсию процесса $x(t)$ выразим зависимостью

$$\sigma_x^2 = \overline{x^2(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T x^2(t) dt. \quad (3)$$

Вклад мощности сигнала от i -го источника в общую мощность W сигнала на выходе в полосе частот Δf выражается для статистически независимых источников уравнением

$$W_i(f) = \alpha r_{iy}^2(\tau_1) W, \quad (4)$$

где α – коэффициент, учитывающий потери корреляции по разным причинам; $r_{iy}(\tau_1)$ – коэффициент взаимной корреляции для первого главного максимума i -го источника.

Потери корреляции в зависимости от спектрального состава сигналов возбуждения ограничиваются за счет выбора ширины частотной полосы анализа, а влияние добротности $Q = \frac{1}{\eta}$ (η – коэффициент потерь структуры) должно быть учтено в соответствии с данными применительно к исследуемым станкам.

Для металлорежущих станков добротность Q составляет от 190 до 650 [8]. При анализе добротности в третьоктавной полосе частот потери корреляции для металлорежущих станков на частотах до 500 Гц в зависимости от расстояния и характера спектра сигналов обычно незначительны, однако в каждом конкретном случае следует ограничивать шириной полосы основные максимумы сигналов.

На рис. 7 приведена нормированная взаимная корреляционная функция для виброускорений корпуса привода и ограждающей конструкции токарно-винторезного станка мод. 16К20 в третьоктавной полосе частот 500 Гц. Величина $r(\tau_1) = 0,5$ при $\tau_1 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ с наблюдается на частоте $f_n = 400$ Гц. С учетом потери корреляции $r(\tau_1)$ составляет 0,8, т.е. на этой частоте привод является основным генератором акустической вибрации станка.

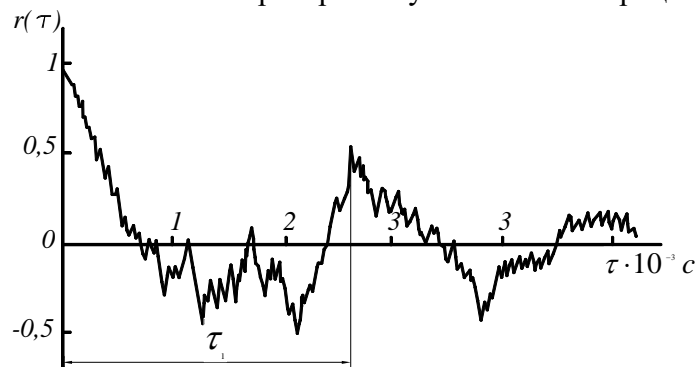


Рис. 7. Нормированная взаимная корреляционная функция $r_{xy}(\tau)$ виброускорений механического привода и ограждающих конструкций токарно-винторезного станка мод. 16К20.

Метод взаимных спектров применялся для выявления наиболее виброактивных механизмов и деталей-излучателей и их вклада в общее излучение и наиболее результативен на высоких частотах в условиях больших потерь корреляции. Данный метод позволяет найти функцию когерентности двух сигналов $\gamma_{xy}^2(f)$, которая выражает линейную связь случайных сигналов:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_x(f)G_y(f)} \leq 1, \quad (5)$$

где $G_{xy}(f)$ – взаимная спектральная плотность процессов $x(t)$, $y(t)$ на входе и выходе (комплексная величина);

$G_x(f)$, $G_y(f)$ – спектральные плотности мощности процессов на входе $x(t)$ и выходе $y(t)$ системы.

Спектральные плотности определим зависимостями:

$$G_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_0^T x(t) e^{-j2\pi f t} dt \right|^2;$$

$$G_y(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_0^T y(t) e^{-j2\pi f t} dt \right|^2;$$

$$G_{xy}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau.$$
(6)

Связь спектральной плотности процесса $x(t)$ с его текущим спектром $S(f, t)$ выразим уравнением

$$G_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \frac{1}{S(f, t)^2} \right).$$
(7)

Спектральная плотность $G_i(f)$ вклада i -го источника в процессе со спектральной плотностью $G_y(f)$ на выходе выражается уравнением

$$G_i(f) = \gamma_{iy}^2(f) G_y(f).$$
(8)

Величина частной когерентности $\gamma_{iy}^2(f)$ однозначно определяет в соответствующей полосе частот вклад рассматриваемого сигнала. Как видно из сравнения с формулой (4), $\gamma_{xy}^2(f)$ является аналогом квадрата коэффициента корреляции $r_{xy}(\tau)$ для узкой полосы частот.

При вычислениях коэффициентов когерентности учитывается смещение их значения к единице, так как в среднем они всегда завышены. Причина смещения (при слишком широкой разрешающей полосе частот по сравнению с шириной максимумов в спектрах) устраняется при вычислениях с помощью усреднения и сглаживания.

На рис. 8 показаны функции когерентности виброускорений на корпусе коробки скоростей вертикально-сверлильного станка мод. 2Н135 и излучаемого ими шума (при $\Delta f = 10$ кГц). Высокие значения максимумов $\gamma_{xy}^2(f)$ для сигналов шум – вибрация (кривая 1) свидетельствуют о значительном вкладе этих деталей в излучение, а малые значения $\gamma_{xy}^2(f)$ для виброускорений деталей (кривая 2) характеризуют независимость колебаний в высокочастотном диапазоне.



Рис. 8. Функции когерентности виброускорений вертикально-сверлильного станка мод. 2Н135

Таким образом, используя рассмотренные выше методы идентификации генераторов и излучателей виброакустической активности металлорежущего оборудования, несмотря на широкий спектр металлорежущих станков, оказывается возможным выявить общие качественные закономерности путей передачи шума и звуковой вибрации. В качестве примера приведем схемы распространения шума и вибрации в токарном (см. рис. 9, а) и сверлильном (см. рис. 9, б) станках.

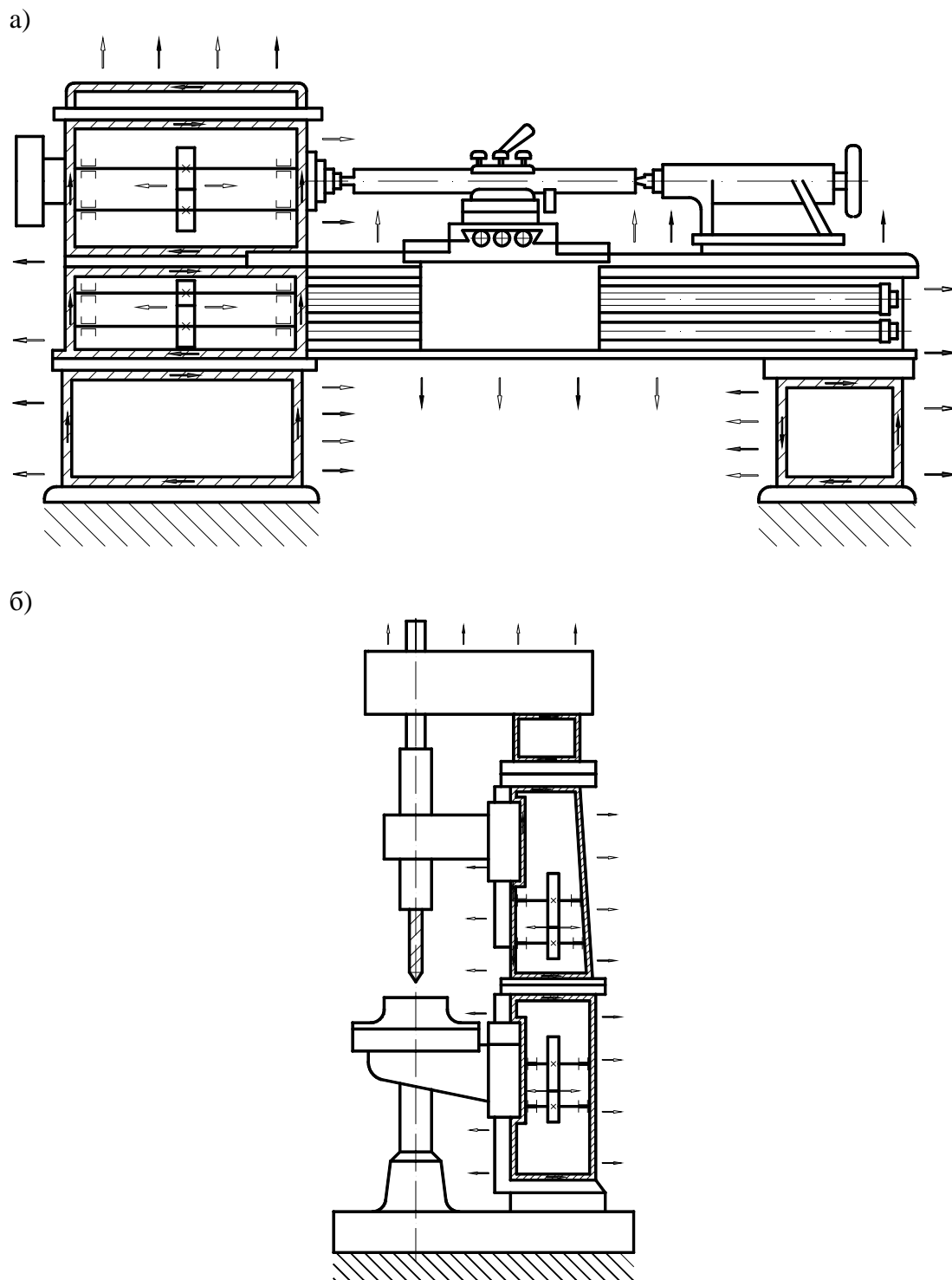


Рис. 9. Пути передачи шума и звуковой вибрации в металлорежущих станках:
 ⇨ – воздушный шум; ⇨ – звуковая вибрация

Перспективным направлением на ранних стадиях проектирования шумопонижающих комплексов является использование ударного демпфирования в сочетании с виброизолирующим эффектом в зубчатых передачах механических приводов металлорежущих станков. Зубчатую передачу вследствие неизбежных погрешностей изготовления и деформации ее деталей под нагрузкой необходимо при конструировании рассматривать не как плоский, а как пространственный механизм. Следовательно, в каждом зубчатом сопряжении с линейчатым контактом при жесткой установке зубчатых колес имеет место одна избыточная связь. Наличие этой связи приводит к неравномерному распределению нагрузки по длине контактных линий при любых отклонениях от параллельности плоскостей, в которых движутся элементы звеньев механизма. По формуле А. П. Малышева для определения числа избыточных связей в пространственных механизмах каждая зубчатая пара будет выдавать одну избыточную связь

$$q = W - 6 \cdot n + \sum_{i=1}^{i=5} i \cdot P_i = 1 - 6 \cdot 2 + 5 \cdot 2 + 2 \cdot 1 = 1, \quad (9)$$

где $W = 1$ – подвижность механизма или число его степеней свободы; $n = 2$ – число подвижных звеньев; n – число звеньев в кинематической паре i -го класса; i – число кинематических пар i -го класса (две пары 5-го класса – подшипниковые узлы, одна пара 2-го класса – зубчатое зацепление с контактом по линии).

Введение дополнительной местной подвижности в соединении обода и ступицы зубчатого колеса позволяет устранить эту связь, снизить величину усилия, необходимого для ее преодоления, повысить равномерность распределения нагрузки по длине контактных линий, что повышает износостойкость и выносливость зубьев. Наличие упругих элементов между ободом и ступицей колеса позволяет изолировать другие звенья кинематической цепи от интенсивных высокочастотных вибраций, генерируемых в зубчатом зацеплении.

В связи с этим была разработана конструкция составного зубчатого колеса с полной виброизоляцией зубчатого венца (см. рис. 10).

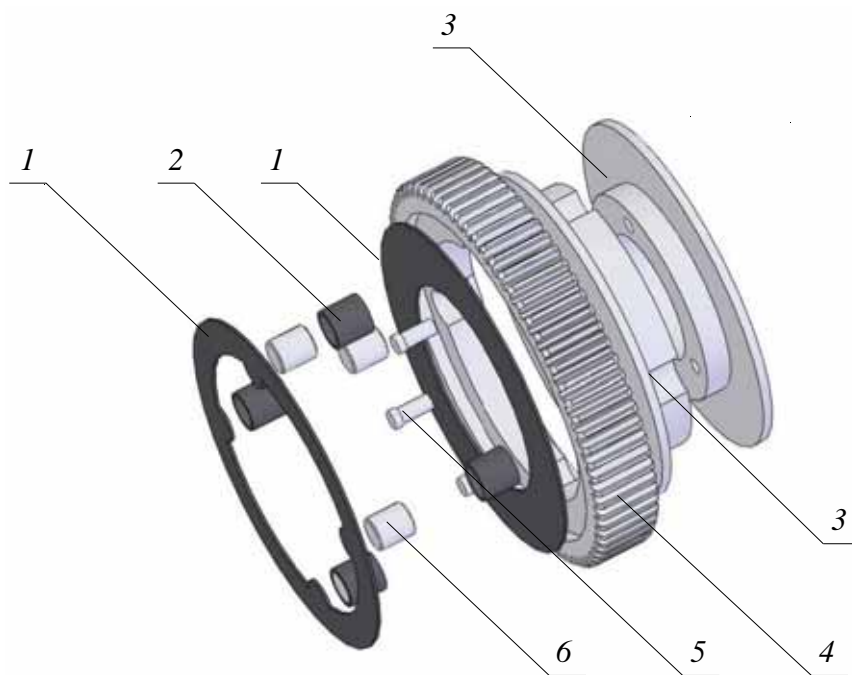


Рис. 10. Конструкция составного зубчатого колеса с полной виброизоляцией венца:
 1 – виброизолирующие прокладки; 2 – виброизолирующие втулки; 3 – ступица;
 4 – зубчатый венец; 5 – крепежные элементы; 6 – ролик

Составное зубчатое колесо (см. рис. 10) состоит из зубчатого венца 4 и разъемной в диаметральной плоскости ступицы, состоящей из двух частей 3, скрепленных между собой болтами 5, что гарантирует соединение от возможности поворота венца относительно ступицы в процессе эксплуатации. В качестве фиксирующих упругих элементов использованы ролики 6, оси которых параллельны оси колеса и лежат на окружности разъема венца и ступицы, помещенные во втулки 2 и по торцам снабженные прокладками 1. Усилия, возникающие на рабочих поверхностях зубьев, передаются венцу. Колебания от зубчатого венца проходят резиновую втулку и прокладку, где и происходит их активное гашение.

Конструкция составного зубчатого колеса позволяет варьировать диаметром и количеством роликов с целью настройки на противорезонанс системы, тем самым уменьшая ее виброакустическую активность. Совокупность втулки и прокладок создает многозвенную полностью виброизолированную и вибродемпфирующую систему. В результате упругих деформаций прокладок и втулок обеспечивается не только самоустановка зубчатого венца от действия возникающих в зацеплении динамических нагрузок, но и их активное гашение. Конструктивные особенности составного зубчатого колеса защищены авторским свидетельством [9].

Обсуждение результатов, выводы. Исследование виброакустических характеристик металлорежущих станков с использованием рассмотренных выше методов локализации генераторов и излучателей шума позволяет сделать следующие выводы:

- частотные спектры уровней шума и вибрации являются практически сплошными, однако почти на каждом из них можно выделить группы интенсивных составляющих зубцовых частот и их высшие гармоники, а также частоты, определяемые кинематическими погрешностями делительных пар зубофрезерных станков. На средних и высоких частотах уровень вибрации в области подшипниковых опор зубчатых передач менее уровня воздушного шума на 6 – 14 дБ;

- исследованием спектра виброакустического сигнала металлорежущих станков, имеющих различные конструктивные и кинематические особенности, установлена принципиально одинаковая структура сигналов, где доминирует зубцовая частота контакта зубьев и ее высшие гармоники первых четырех зубчатых передач привода станка. Однако нельзя однозначно утверждать, что остальные зубчатые колеса не влияют на шумоизлучение станка;

- металлорежущее оборудование, имеющее сложные кинематические и конструктивные особенности, содержит несколько независимых источников акустической энергии – корпусные элементы коробки скоростей, станина и ограждающие конструкции станка;

- шум во внешнее пространство от зубчатых колес может проникать двумя путями. Первый – звуковые волны от работы зубчатого зацепления через воздушный промежуток воздействуют непосредственно на корпусные и ограждающие конструкции станка. Под действием звуковых волн в них возбуждаются колебания и излучается шум, второй – звуковая вибрация от источника по валам, через станину, опорные конструкции и стыковые соединения передается на внешние ограждающие конструкции, которые начинают колебаться и излучать шум;

- в ограждающих конструкциях металлорежущих станков имеются технологические отверстия (вентиляционные каналы, смотровые окна и т.д.). Наличие обязательных стыковых соединений сопровождается щелевыми отверстиями и неплотностями. Шум металлорежущих станков складывается из шума, излучаемого корпусными и ограждающими конструкциями, колеблющимися под действием шума внутри них, и вследствие передающихся на них вибраций, шума, излучаемого станиной, и шума, проходящего через отверстия и неплотности;

- снижение шума металлорежущих станков может быть реализовано за счет снижения колебательной энергии в источнике его образования, на пути и в местах распространения;

– результаты экспериментальных исследований составного зубчатого колеса в передачах коробок скоростей доказывают эффективность использования данной конструкции для виброизоляции и демпфирования колебаний станочного оборудования. По абсолютной величине уровни звукового давления, зарегистрированные при испытаниях составного зубчатого колеса для отдельных зубцовых частот, в 2 – 3 раза ниже (т.е. 6 – 10 дБ), чем при испытаниях обычной серийной передачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н. И. Иванов. – М.: Логос, 2008. – 423 с.
2. Месхи, Б. Ч. Улучшение условий труда операторов металлорежущих и деревообрабатывающих станков за счет снижения шума в рабочей зоне (теория и практика) / Б. Ч. Месхи. – Ростов н/Д: ДГТУ 2003. – 131 с.
3. Чукарин, А. Н. Влияние рабочего процесса на шумообразование полуавтомата для изготовления сетки из стального листа /А. Н. Чукарин, Г. В. Самодуров, А. А. Феденко // Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности: труды Междунар. эколог. конгр., 14–16 июня. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2000. – Т.2.– С. 226-229.
4. Механизмы параллельной структуры в металлорежущих станках / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, Е. В. Самар // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № IV–1(12). – С. 52-61.
5. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
6. Генкин, М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
7. Бендат, Дж. Применение корреляционного и спектрального анализа / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
8. Медведев, А. М. Исследование с помощью универсальной установки вибропоглощающих характеристик металлорежущих станков / А. М. Медведев, Г. В. Литовка // Обработка металлов. – 2007. – № 4 – С. 32-35.
9. А.с. № 1551913 СССР, МКИ5 F 16 H 55/17, 55/14. Составное зубчатое колесо / А. М. Медведев, Н. Л. Суханов, А. В. Бушманов, А. С. Чурилин. – № 4424362/25-28; заявл.12.05.88, опубл. 23.03.1990, Бюл. № 11. – С. 140.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
METALLURGY AND MATERIALS TECHNOLOGY

Ким В. А., Евдокимова Р. В., Золотарева С. В., Попкова А. А., Йошида М.
V. A. Kim, R. V. Yevdokimova, S. V. Zolotareva, A. A. Popkova, M. Yoshida

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ

STATISTICAL EVALUATION IN QUANTITATIVE METALLOGRAPHY

Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: mtnm@knastu.ru

Mr. Vladimir A. Kim – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur. E-mail: mtnm@knastu.ru

Евдокимова Раиса Викторовна – инженер-патентовед Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

Ms. Raisa V. Yevdokimova – Patent Engineer, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur.

Золотарева Светлана Валерьевна – старший преподаватель кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

Ms. Svetlana V. Zolotareva – Senior Lecturer, Department of Chemical Production Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur.

Попкова Александра Александровна – инженер-патентовед Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

Ms. Alexandra A. Popkova – Patent Engineer, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur.

Йошида Масаша – профессор Национального технологического колледжа, г. Убе, Япония

Mr. Yoshida Masashi – Professor, National Technical College, city of Ube, Japan.

Аннотация. Микроструктуру поликристаллического материала можно количественно описать плотностью границ зерен. Выполнен статистический анализ кривых распределения плотности границ зерен микроструктуры конструкционной стали 45 после различных видов термической обработки и пластической деформации растяжения. Показана связь между характером изменения кривых распределения и структурными изменениями.

Summary. The microstructure of a polycrystalline material can be described quantitatively by the density of grain boundaries. The paper presents a statistical analysis of distribution curves of boundary density of grains of a microstructure in a structural steel 45 after various kinds of thermal processing and plastic tensile deformation. We have demonstrate a link between the change of distribution curves and structural change.

Ключевые слова: микроструктура, количественная металлография, плотность границ зерен, закон распределения, математическое ожидание.

Key words: microstructure, quantitative metallography, grain boundary density, distribution law, population mean.

Количественные показатели структурного состояния

Металлографический шлиф является срезом объемной микроструктуры в некоторой плоскости сечения, поэтому одна и та же структура проявляется в разных сечениях по-разному, сохраняя единую закономерность организации схожих микрогеометрических объектов. Изображение микроструктуры материала с формальной точки зрения представляет совокупность одно- и двумерных геометрических множеств с разной степенью упорядоченности. Из упорядоченных геометрических множеств можно выделить такие, которые наиболее полно отражают структурное состояние материала и несут информацию о предыстории её развития. Комплекс таких геометрических объектов выполняет функцию структурного интерфейса.

Развитие структуры материала подчиняется законам термодинамики и определяется стремлением структурной организации к такому состоянию, при котором свободная энергия системы стремится к минимуму. Для поликристаллических материалов это условие представляется в виде [1, 2]

$$\delta F = \sum_{i=N} (S\gamma - V\mu)_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где δF – приращение свободной энергии; S , V – площадь поверхности и объем каждого зерна; γ , μ – удельная поверхностная и внутренняя (химический потенциал) энергии; N – общее количество зерен в заданном объеме материала.

Из условия (1) следует, что отношение площади граничной поверхности к объему каждого зерна определяется соотношением между химическим потенциалом и удельной поверхностной энергией, т.е.

$$\frac{S}{V} \propto \frac{P}{F} \propto \frac{\mu}{\gamma}. \quad (2)$$

Применительно к плоскостному изображению микроструктуры отношение площади поверхности к объему зерна адекватно отношению периметра границы P к площади сечения зерна F . Назовем эту характеристику плотностью границ зерен q . Характер распределения плотности границ зерен отражает структурно-энергетическое состояние материала и, следовательно, его физико-механические свойства. Меньшая величина плотности границ зерен указывает на большую устойчивость структуры, преобладание крупных и равноосных зерен.

Современные компьютерные средства обработки изображений позволяют по оцифрованным фотографиям микроструктур выявлять в пределах одного снимка от 200 до 4500 объектов и определять необходимые количественные характеристики каждого зерна для вычисления плотности границ.

Цель настоящей работы – статистическая оценка количественных структурных показателей, определенных методом компьютерной металлографии, и анализ структурных состояний материалов, подвергнутых различным видам обработки.

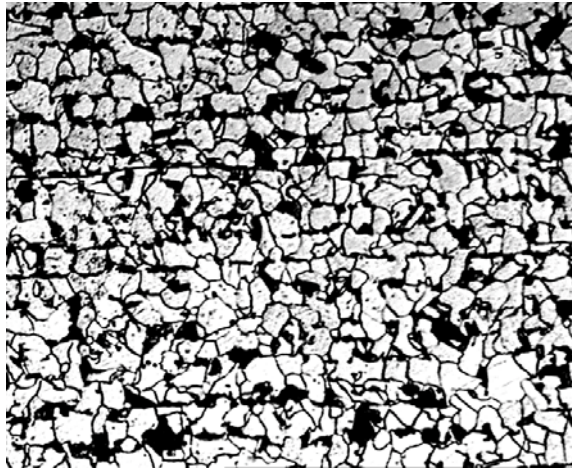
Методика исследования

Объектом исследования были микроструктуры сталей 45. Различные структурные состояния обеспечивались различными режимами термической и деформационной обработок. Компьютерная обработка фотографий микроструктур проводилась с помощью программы Image.Pro.Plus.5.1 и включала корректировку изображения, выделение границ зерен и других микроструктурных объектов, калибровку или приведение в соответствие кратности увеличения и шкалы измерения. Результатом обработки фотографии микроструктуры являлось её

изображение с выделенными границами зерен и раздела фаз. На рис. 1 в качестве примера приведена микроструктура листовой стали 45 до и после компьютерной обработки.

Количественные характеристики определялись по преобразованным изображениям, которые в дальнейшем транспортировались в Excel для расчета комплексных характеристик и статистического анализа.

а)



б)

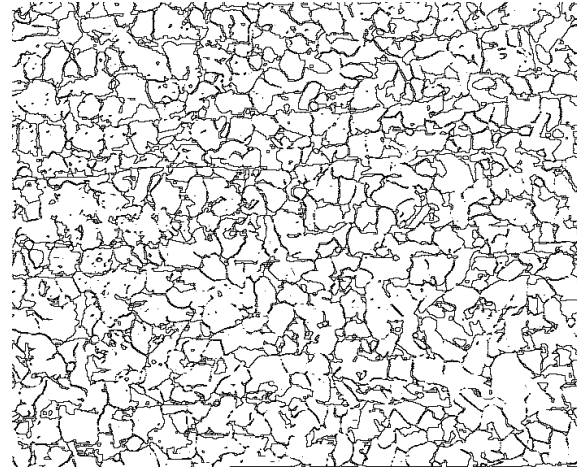


Рис. 1. Микроструктура стали 45 до (а) и после компьютерного преобразования (б)

Статистическая обработка предусматривала построение гистограмм и расчет вероятностных показателей распределения плотности границ зерен.

Расчет весовых коэффициентов частот распределения проводился по формуле

$$\lambda_j = \frac{\sum_j F_i}{\sum_N F_i}, \quad (3)$$

где $\sum_j F_i$ – сумма площадей зерен j-го интервала; $\sum_N F_i$ – общая сумма всех зерен в пределах одной фотографии.

Нагрев образцов при термической обработке выполнялся в муфельной печи СНОЛ 3-1. Режимы термической обработки стали 45 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы термической обработки стали 45

Режимы термической обработки	Структура	HV, кгс/мм ²
1. Закалка с нагревом до 850 °С и охлаждение в воду	Мартенсит	520...550
2. Закалка с нагревом до 850 °С и охлаждение в масло	Мартенсит	470...500
3. Отжиг с нагревом до 850 °С и охлаждение с печью	Перлит	230...260

Микротвердость определялась с помощью микротвердомера ПМТ-3, испытание на растяжение осуществлялось на универсальной испытательной машине INSTRON-8822.

Результаты статистического анализа различных микроструктур

На рис. 2 показано распределение плотности границ зерен микроструктуры стали 45 в отожженном состоянии, после закалки в воде и в масле. На рис. 3 представлены весовые коэффициенты частот распределения плотности границ зерен.

Микроструктура отожженного состояния характеризуется выраженным бимодальным распределением плотности границ зерен, при этом первый максимум в области малых значений q относится к крупным зернам, а второй максимум в области больших значений q – к мелким зернам, расположенным преимущественно по границам крупных зерен и в зоне стыков тройных вершин зерен. Зон повышенной концентрации мелких зерен не наблюдается.

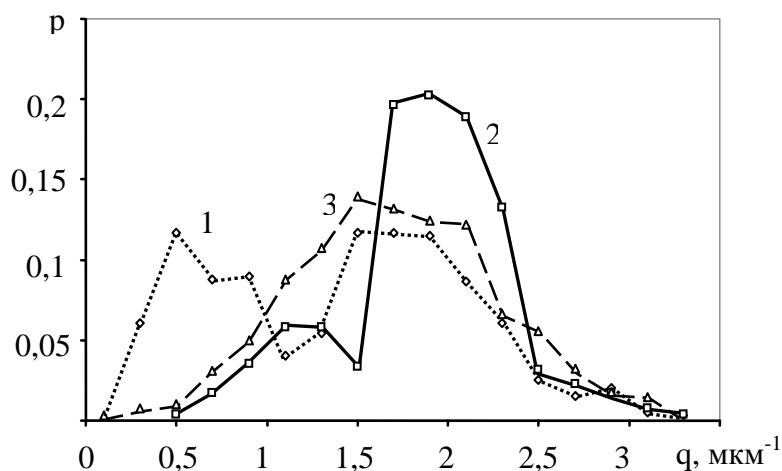


Рис. 2. Распределение плотности границ зерен микроструктуры стали 45:
1 – отжиг; 2 – закалка в воду; 3 – закалка в масло

После закалки в воду бимодальный характер распределения сохраняется, но первый максимум смещается в большую сторону и уменьшается по величине, второй максимум резко возрастает по величине и также незначительно смещается в область больших значений q . Такой характер изменения закона распределения плотности границ отражает кинетику образования мартенситной структуры с развитыми двойниковыми границами. Проявление первого максимума связано с присутствием в структуре остаточного крупнозеренного аустенита, а снижение частоты вызвано с изменением его процентного содержания.

Плотность границ зерен применительно к мартенситной структуре теряет традиционное содержание. Образование мартенситных игл протекает со сверхвысокой скоростью внутри зерна аустенита [3]. Линейные образования на микрофотографии мартенсита представляют границы двойников, пронизывающих аустенитные зерна, при этом границы самих зерен могут быть выявлены только с помощью специального отжига и травления [4].

Микроструктура после закалки в масло представляется более однородной. Распределение плотности границ зерен близко к нормальному закону, а отсутствие бимодальности указывает на незначительное присутствие остаточного аустенита. Границы зерен практически не проявляются, и на изображении структур видны только границы двойников. Плотность границ является в этом случае отображением не зеренной структуры, а двойниковых границ.

Форму любого зерна можно привести к равновеликой равноосной фигуре и оценить её приведенным средним диаметром d . Плотность границ в этом случае можно выразить следующим образом:

$$q_{кр} = \frac{\pi d}{0,25\pi d^2} = \frac{4}{d}. \quad (4)$$

Все кристаллиты можно условно разделить на две группы: крупные зерна, условный диаметральный размер которых больше 4 мкм, и мелкие с диаметральный размером меньше

4 мкм. Крупные зерна характеризуются плотностью границ меньше $1,0 \text{ мкм}^{-1}$, мелкие – больше этой величины.

Распределение весовых коэффициентов в зависимости от плотности границ носит гиперболический характер и указывает, что зерна с менее развитой границей заполняют больший объем материала, но их роль в формировании структурно-энергетических показателей незначительна. В области крупных зерен наименьшие весовые коэффициенты обеспечиваются при закалке в масло. Относительно высокие весовые коэффициенты в этом диапазоне для структур, сформированных при закалке в воде, связаны с остаточным аустенитом (см. рис. 3). В диапазоне высоких значений плотностей границ зерен характер распределения весовых коэффициентов в зависимости от вида термической обработки меняется противоположным образом, указывая на образование более мелких зерен и более развитых границ.

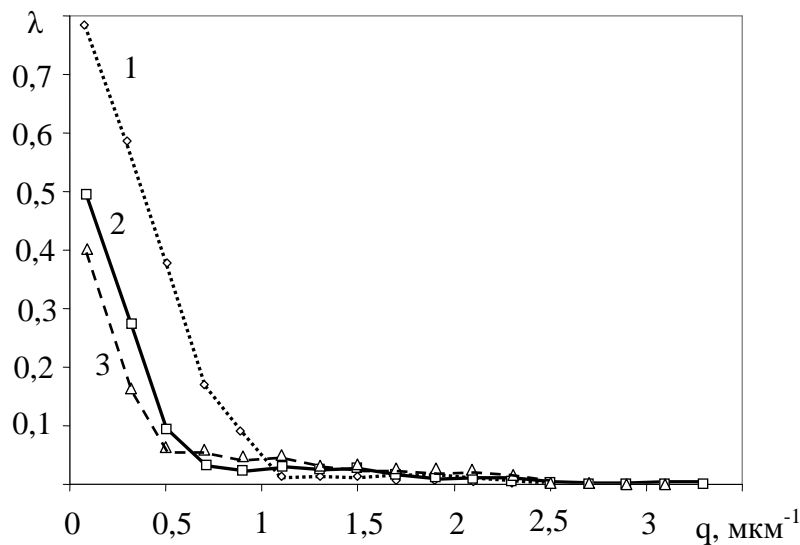


Рис. 3. Весовые коэффициенты распределений границ зерен:
1 – отжиг; 2 – закалка в воду; 3 – закалка в масло

Диапазон рассеивания плотности границ зерен после закалки в масле принимает большие значения, а математическое ожидание меньшее по сравнению с закалкой в воде, косвенно подтверждая, что в этом случае формируется более устойчивая и равновесная структура.

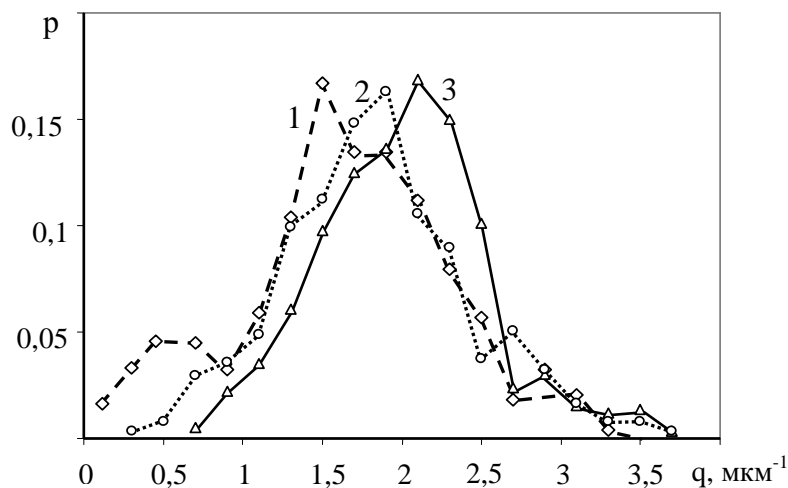


Рис. 4. Распределение плотности границ зерен микроструктуры стали 45:
1 – растяжение на 5 %; 2 – растяжение на 20 %; 3 – после разрыва

На рис. 4 представлены кривые распределения плотности границ зерен стали 45, подвергнутой растяжению. Исследовались микроструктуры в центральной части образца в поперечных сечениях относительно растягивающих напряжений. Исходная микроструктура материала достигалась отжигом и характеризовалась бимодальным законом распределения (кривая 1 на рис. 2). При малых степенях деформации бимодальность сохраняется, а при 20 % деформации полностью исчезает. С повышением степени деформации центр группирования распределения смещается в область больших значений q , а диапазон рассеивания сужается.

Структурные изменения при пластической деформации происходят в результате развития различных дефектов кристаллического строения на микро- и мезомасштабном уровнях. При малых напряжениях деформация происходит за счет двойников, далее – в результате развития дислокации и дисклинаций, а при высоких напряжениях процесс пластической деформации переходит на мезоуровень и реализуется в виде межзеренного скольжения, образования мезокластеров и их ротационной динамики [2, 5, 6, 7].

В табл. 2 представлены значения математических ожиданий распределений плотности границ зерен при различной степени деформации.

Таблица 2

Математическое ожидание распределений плотности границ зерен при различной степени деформации

Степень деформации, %	Плотность границ зерен, 1/мкм	Степень деформации, %	Плотность границ зерен, 1/мкм
0	1,412	20	1,844
5	1,976	30	1,841
10	1,881	разрушение	2,005

Из табл. 2 видно, что наибольшее приращение плотности границ имеет место при 5 % пластической деформации, затем наблюдается монотонное снижение до 30 % деформации и резкий скачок q в результате разрушения образца. Положение максимумов не совпадает с величинами математических ожиданий в результате асимметрии восходящих и нисходящих ветвей кривых распределения q . Восходящая ветвь в большинстве случаев представляется более крутой, по сравнению с нисходящей, указывая, что структурные элементы с высокой плотностью границ являются более устойчивыми к пластической деформации, и структурным изменениям подвергаются преимущественно крупные микроструктурные составляющие с низкой плотностью границ.

Сохранение бимодальности при степени деформации 5 % указывает, что носители деформации развиваются преимущественно внутри зерен, а повышение «развитости» границ является результатов выхода на них линейных дефектов кристаллического строения. Снижение величины математического ожидания с дальнейшим повышением степени деформации вызвано образованием мезокластеров или фрагментированных элементов, представляющих совокупность зерен, объединенных когерентными границами раздела и развитой внешней границей кластера. Плотность дефектов кристаллического строения внутри зерен возрастает, но этот показатель не фиксируется используемыми количественными характеристиками компьютерной металлографии. «Развитость» границы кластера ниже, чем у границ зерен, и это отражается на величине математического ожидания.

Заключение

Информативной количественной характеристикой структурного состояния материала является плотность границ зерен и раздела фаз (отношение периметра к площади зерна или фрагмента отдельной фазы) и вероятностный характер их распределения. Динамика измене-



ния характера распределения плотности границ вместе с весовым коэффициентом частоты отражают особенности структурных изменений, протекающих при термической обработке и пластической деформации. Закономерности этой взаимосвязи были освещены применительно к структуре конструкционной стали 45. Показано, что применительно к мартенситной структуре плотность границ зерен теряет традиционный смысл и становится количественной характеристикой двойниковых границ.

Установлено, что распределение плотности границ зерен отожженной структуры стали 45 носит бимодальный характер, который сохраняется после закалки в воду и незначительной пластической деформации.

Изменение математического ожидания распределения плотности границ зерен с повышением степени пластической деформации отражает динамику структурных изменений и доминирующий носитель деформации. Переход пластической деформации на мезоуровень приводит к снижению плотности границ зерен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кристиан, Д. Теория превращения в металлах и сплавах / Д. Кристиан. – М.: Мир, 1978. – 806 с.
2. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балахов, А. В. Болеста, М. П. Бондарь и др.; отв. ред. В. Е. Панин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
3. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1978. – 648 с.
4. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали. – 5-е изд., перераб. и доп. / Ю. А. Геллер. – М.: Металлургия, 1983. – 527 с.
5. Новиков, И. И. Кристаллография и дефекты кристаллического строения: учебник для вузов / И. И. Новиков, К. М. Розин. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с.
6. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин, П. В. Макаров и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1995. – Т. 1 – 298 с.
7. Ким, В. А. Влияние пластической деформации при резании металлов на микроструктуру поверхностного слоя / В. А. Ким, Т. А. Отряскина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № II-1(2). – С. 81-87.

Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Комаров О. Н.

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПРЕССОВАНИИ УДАЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Комаров О. Н.

I. G. Sapchenko, S. G. Zhilin, O. N. Komarov

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПРЕССОВАНИИ УДАЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

EFFECTS OF THE PLASTICITY OF POLYMER POWDER MATERIALS ON THE FORMATION OF STRESS-STRAIN STATES, DURING PRES-FORMING OF CONSUM-ABLE PATTERNS

Сапченко Игорь Георгиевич – доктор технических наук, доцент, ученый секретарь Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mail@imim.ru

Mr. Igor G. Sapchenko – Doctor of Engineering, Associate Professor, Academic Secretary of the Institute for Machine Engineering and Metallurgy, the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur. E-mail: mail@imim.ru

Жилин Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: zhilin@imim.ru

Mr. Sergey G. Zhilin – PhD in Engineering, Senior Research Fellow, of the Institute for Machine Engineering and Metallurgy, the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur. E-mail: zhilin@imim.ru

Комаров Олег Николаевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

Mr. Oleg N. Komarov – PhD in Engineering, Senior Research Fellow of the Institute for Machine Engineering and Metallurgy, the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur. E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

Аннотация. При формировании пористых моделей прессованием полимерных порошков происходит перемещение частиц. При этом образуются области неравномерного уплотнения, обладающие различным упругим последствием, что ведет к неудовлетворительной размерно-геометрической точности моделей. В работе представлены результаты исследования влияния фракции полимерного порошка и технологических параметров получения прессовок из него на свойства моделей.

Summary. During the process of forming porous patterns by cold-pressing of a polymer powder, particles of the powder are moving and melting into frictional surfaces. This results in the emergence of areas of non-uniform densification with different elastic after-effects, which leads to poor dimension/geometric accuracy of the patterns. The paper presents the results of an investigation of the effects the properties of a polymer powder and the process parameters of pressing have on the accuracy of patterns.

Ключевые слова: полимер, порошок, пористость, модель, напряженно-деформированное состояние, точность отливок.

Key words: polymer, powder, porosity, pattern, stress-strain state, casting precision.

Работа выполнена при поддержке средств гранта ДВО РАН 11-III-B-03-041 «Исследование влияния пластичности полимерного порошкового материала на формирование напряженно-деформированного состояния прессовок».

УДК 621.74.045



В литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) опробованы сотни модельных составов, лишь незначительная часть из которых соответствует требованиям и свойствам, удовлетворяющим промышленные предприятия в полной мере [1; 2].

Широко используемые в ЛВМ парафиностеариновые составы (ПС 50/50, ПС 70/30, П65С32Км3, П70С25Э5) обладают требуемыми реологическими свойствами в пастообразном состоянии, теплоустойчивостью и прочностными свойствами. Однако применение этих составов при изготовлении моделей приводит к образованию таких видов брака, как усадка и коробление. Применение моделей сопровождается растрескиванием оболочковых форм при их удалении.

Проведенным анализом эксплуатационных и технологических свойств восковых удаляемых моделей установлено, что на стадиях получения и использования керамических оболочек предпочтительно использование пористых моделей, имеющих наименьший коэффициент термического расширения (КТР), т.к. процесс удаления не приводит к увеличению их объемов. Таким образом, применение нестандартных вариантов образования пор в теле восковой модели, способов ее изготовления и удаления, которое позволит устранить практически все виды брака, образуемые моделью, представляется актуальным.

Пористость в полимерной модели (ППМ) образуется в результате запрессовки порошка модельной массы в полость пресс-формы [4]. Прессование воскообразной фракции порошка представляет собой процесс деформирования его замкнутого объема (при этом могут использоваться как одно- так и многокомпонентные порошки), при котором начальный объем смеси сокращается и происходит формирование прессовки (воскообразной удаляемой модели) требуемой формы с заданными размерами и свойствами. Объем смеси воскового порошка, помещенной в формообразующую полость пресс-формы, при смыкании пуансонов сокращается ввиду деформирования и смещения воскообразных частиц порошка, которые распределяются в пустотах между частицами [5].

Идеализированная кривая уплотнения, выражающая зависимость плотности прессовки от давления прессования, характеризуется тремя основными участками, представленными на рис. 1, *а*. Наибольшая динамика изменения плотности порошка прессовки наблюдается на первой стадии уплотнения. На этот процесс влияет перемещение частиц порошка под действием приложенной внешней нагрузки. Порошковые частицы на первой стадии уплотнения распределяются по пустотам тела прессовки достаточно свободно, причем поверхности частиц, близко расположенных друг к другу, не испытывают значительного взаимного трения. Другие частицы могут перемещаться не так интенсивно ввиду высокого взаимного трения поверхностей частиц уплотняемого порошкового тела.

Уплотнение на первой стадии (позиция I, см. рис. 1, *а*) осуществляется по причине перераспределения воскообразных частиц, которое происходит в результате разрушения «арок». На этой стадии происходит структурная деформация уплотняемого порошкового тела. Существенную роль в этот момент играет упругая разгрузка ряда контактов частиц, которая соответствует началу уплотнения воскообразного порошка. Так как происходит разгрузка некоторых контактов частиц в уплотняемом порошковом теле, сокращаются межчастичная сила сцепления и площади их контактов, а значит, наблюдается рост напряжений в зоне контактов частиц, в результате взаимное смещение расположенных рядом частиц становится легче и в зонах остаточных контактов происходит пластическая деформация, способствующая ускорению роста плотности прессовки.

Следующий этап уплотнения порошкового тела (позиция II, см. рис. 1, *а*) характеризуется ростом давления прессования ввиду сопротивления сжатию максимально плотно упакованных частиц. При этом плотность прессовки некоторое время остается постоянной. Ввиду наличия силы упругой деформации в теле прессовки местная разгрузка контактов частиц на уплотнение влияет незначительно, а пластическая деформация в зоне контактов частиц порошка локализована.

Последняя стадия характеризуется превышением сопротивления сжатию уплотняемых частиц (давлению прессования), и проявляется пластическое деформирование уплотня-

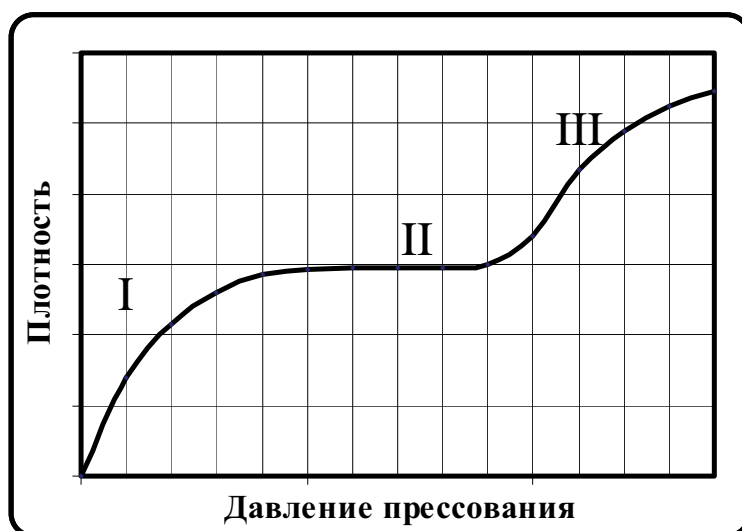
Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Комаров О. Н.

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПРЕССОВАНИИ УДАЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

емых частиц порошкового тела (позиция III, см. рис. 1, а). На этой стадии деформация является пластической и затрагивает объем каждой частицы всего порошкового тела, при котором взаимное смещение контактов между частицами прекращается.

На практике в процессе прессования порошков (как одно- так и многокомпонентных) наблюдается одновременное прохождение указанных выше стадий прессования порошков [6]. Поэтому реально наблюдаемая кривая, характеризующая процесс уплотнения воскообразного пластичного порошка, равномерна. На этой кривой горизонтальные участки, характерные для идеализированного случая, почти отсутствуют (см. рис. 1, б). При сравнительно невысоких давлениях прессования на практике могут наблюдаться деформации отдельных частиц воскообразного порошка (например, ПС 50/50), равно как и взаимное поверхностное скольжение ряда частиц при высоком уплотняющем давлении. Для увеличения плотности порошкового тела наиболее значимой является первая стадия уплотнения, при которой происходит взаимное перемещение частиц порошка. При этом чем материал пластичнее, тем меньшее давление требуется для деформации частиц. Для материалов с повышенным пределом текучести характерно наличие резкого разграничения начальной и конечной стадий уплотнения. Установлено, что при прессовании энергия затрачивается на преодоление межчастичного и внешнего трения, а также на деформацию полимерных частиц. Внешнее трение в данном случае возникает между частицами и поверхностью пресс-формы или пуансонами.

а)



б)

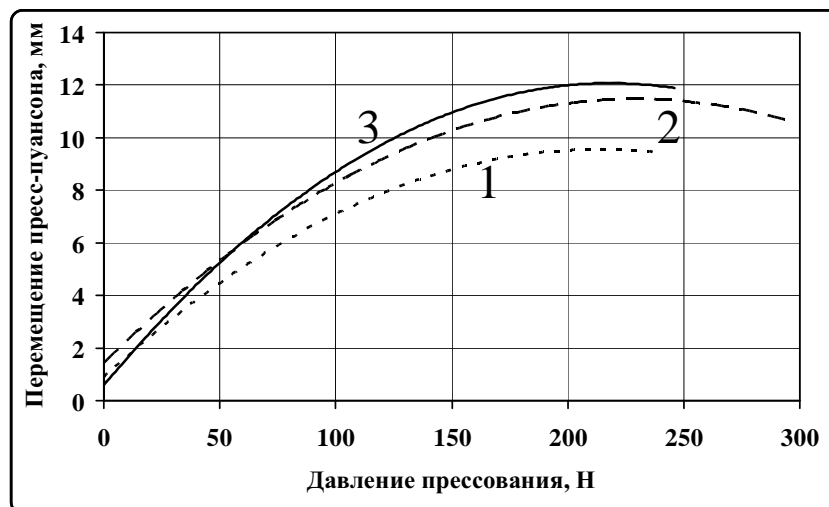


Рис. 1. Кривая уплотнения, выражающая зависимость плотности прессовки от давления прессования: а – идеализированная кривая уплотнения; б – стадии процесса уплотнения реального однокомпонентного ПМС:

1 – ПМС фракции 1,6 мм; 2 – ПМС фракции 1,0 мм; 3 – ПМС фракции 0,63 мм

При осуществлении процесса уплотнения порошка значительной задачей является получение ППМ с равномерно распределенными физико-химическими и механическими свойствами.

При изготовлении удаляемых моделей из порошков, в состав которых входит два и более компонентов, отличающихся по фракционному составу, требуется учет их напряженно-деформированного состояния (НДС), которое выражается в неравномерности распределения свойств в пористых удаляемых моделях. Отсутствие равномерности распределения плотностей в прессовках ведет, как правило, к изменению размеров и форм, которое проявляется ввиду оплавления краев уплотняемых частиц и вызывает негативные изменения свойств прессованного порошкового тела [3; 5].

Упаковка частиц на поверхности пористой модели зависит от материала фракции однокомпонентного порошкового модельного состава (ПМС) и определяется поверхностной твердостью, которая, в свою очередь, позволяет выдерживать требуемые размерно-геометрические параметры прессовки. На рис. 2 представлены зависимости изменения твердости поверхности ППМ, полученных из различных фракций ПМС, от пористости.

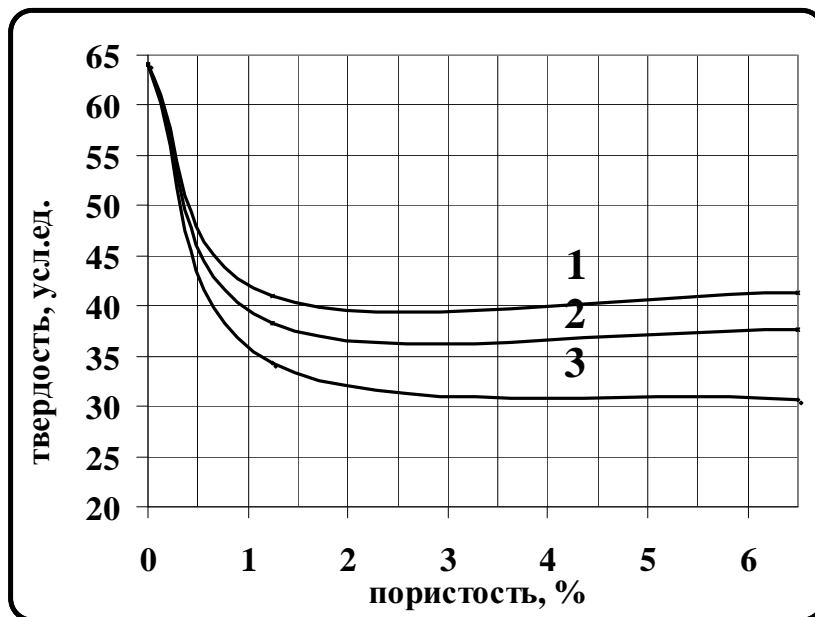


Рис. 2. Зависимость изменения твердости поверхности ППМ, полученных из различных фракций ПМС, от пористости: 1 – ПМС фракции 1,6 мм; 2 – ПМС фракции 1,0 мм; 3 – ПМС фракции 0,63 мм

Из рис. 2. видно, что прессовки, полученные из ПМС меньшей фракции, обладают меньшей поверхностной твердостью. Поверхностная твердость в данном случае определялась стандартным игольчатым твердомером типа 2033 ТИР с размерностью измеряемых значений, выраженной в условных единицах.

Трение между частицами влияет на поверхностную твердость удаляемых пористых моделей, но не является причиной неравномерного распределения значений плотности.

На рис. 3 показано изменение плотности по высоте прессовки при одностороннем прессовании порошка модельного состава фракции 1,0 мм, который соответствует по хими-

Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Комаров О. Н.

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПРЕССОВАНИИ УДАЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ческому составу модельным материалам 1 группы классификации полимерных составов (ПС 50/50), предложенной В. А. Озеровым [1].

Под односторонним прессованием полимерного порошка понимают его уплотнение, при котором усилие прикладывается к порошковому телу только с одной стороны. При одностороннем прессовании в зависимости от давления более плотными могут оказаться верхняя и нижняя части прессовки, тогда как в ее середине наблюдается зона пониженной плотности, называемая нейтральной [1; 4; 5], и наоборот.

При уплотнении однородных по размерам частиц и химическому составу полимерных пластичных порошков величина пористости находится в зависимости от фракции полимерного порошка и прессующего усилия [1; 3].

Предварительным экспериментом определена способность фракции порошка полимерного модельного состава сохранять форму после прессования. Установлено, что в субстанции, изготовленной таким способом, распределение свойств неравномерное, напряжения повышенные, а структура пористая. Выявлено, что полимерные многокомпонентные модели, изготовленные из порошков модельных композиций, также отличаются пористостью структур.

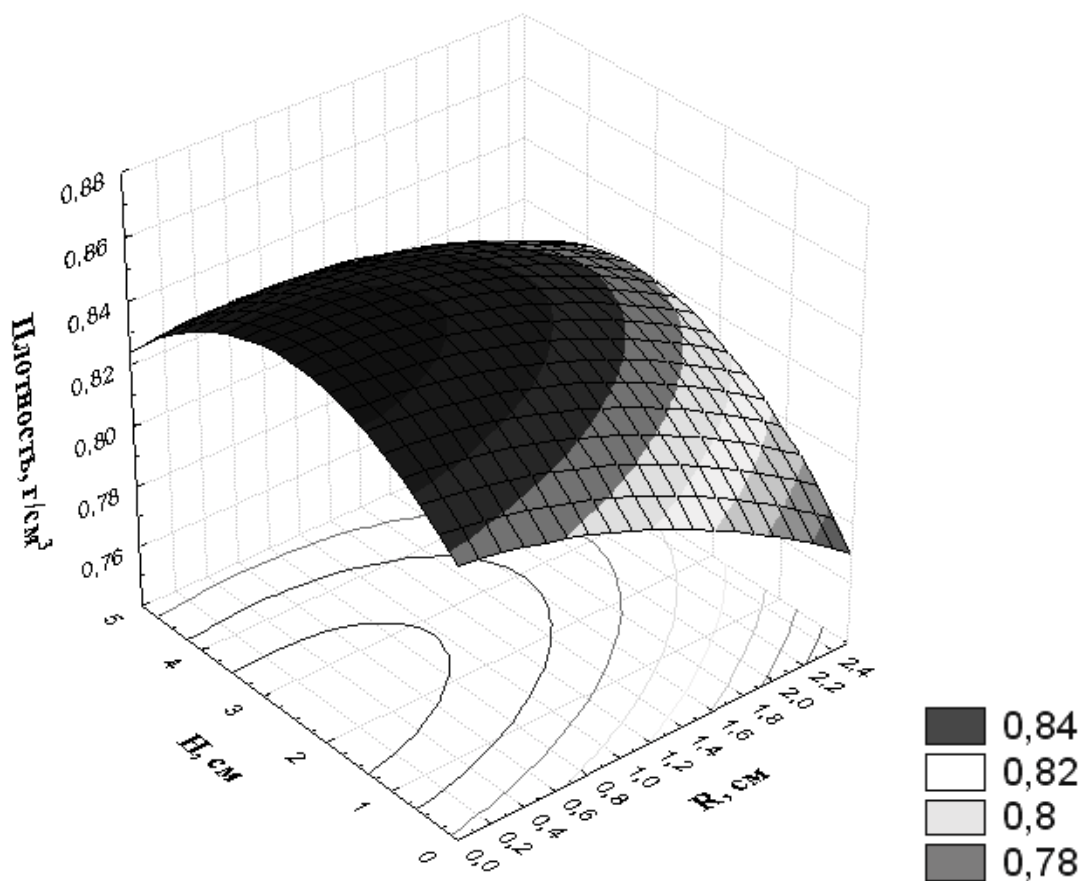


Рис. 3. Изменение плотности по высоте прессовки при одностороннем прессовании порошка фракции 1,0 мм и по сечению

На конечную плотность ППМ в большей мере влияют плотности компонентов исходной деформируемой смеси, чем усилие ее деформации. Для получения полимерных моделей с повышенной плотностью необходимо использовать мелкую фракцию ПМС. Предопределяемая заранее величина плотности при известных давлениях уплотнения смеси достигается при использовании материалов равной фракции.

На конечную плотность ППМ также оказывают значительное влияние деформационные процессы, протекающие в структуре прессовки при уплотнении. В зависимости от сте-

пени деформационного сжатия в связке ППМ возникают упругие деформации, стремящиеся к релаксации при снятии нагрузки.

Исследование влияния степени деформационного сжатия или пористости материала связки в ППМ на упругое релаксационное последствие (см. рис. 4) выявило закономерность: наибольшей степени деформации при уплотнении ППМ, т.е. наименьшей пористости воскообразного связующего материала, соответствует самое значительное упругое последствие. Напряжения, возникающие после окончательной стадии прессования полимерного порошка, снижаются в результате релаксации упругим последствием, что ведет к увеличению объема после разгрузки ППМ, понижая ее плотность.

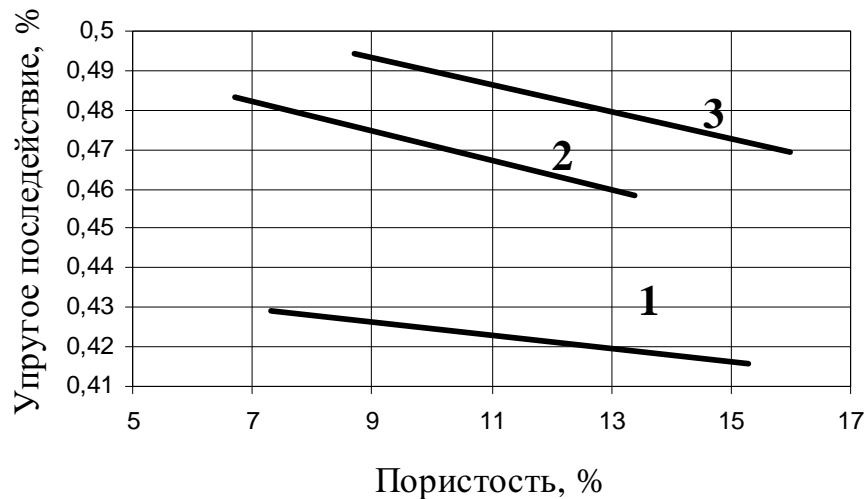


Рис. 4. Зависимость упругого последствия от пористости материала связки ППМ фракции: 1 – 0,63 мм; 2 – 1,0 мм; 3 – 1,6 мм

Влияние фракционности связующего воскообразного материала на значение упругого последствия обусловлено величиной абсолютной его деформации, которая компенсируется пористостью и плотностью материала, распределенной в объеме ППМ. При адекватной степени сжатия объема ППМ крупной фракции материала соответствуют большие упругие деформации, кратные размерам гранул. Отмеченный механизм упругого последствия оказывает влияние и на остальные физико-механические свойства ППМ.

Таким образом, экспериментально установлено следующее:

- распределение плотности в структуре ППМ при одностороннем прессовании однокомпонентного порошка ПМС соответствует распределению плотности, адекватному двустороннему приложению прессующего усилия;
- прессовки, полученные из ПМС большей фракции, обладают большей поверхностной твердостью;
- на конечную плотность ППМ наибольшее влияние имеют значения плотности компонентов исходной деформируемой смеси, а не давление, приводящее к деформации этой смеси;
- при равной степени сжатия объема ППМ крупной фракции материала соответствуют большие упругие деформации, кратные размерам гранул, что оказывает влияние на НДС прессовки и, следовательно, на остальные физико-механические свойства ППМ.

Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Комаров О. Н.

**ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПРЕССОВАНИИ
УДАЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

ЛИТЕРАТУРА

1. Сапченко, И. Г. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 138 с.
2. Напряженно-деформированное состояние оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям / И. Г. Сапченко, С. А. Некрасов, С. Г. Жилин, М. В. Штерн. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2005. – 156 с.
3. Сапченко, И. Г. Усовершенствование технологии получения точных металлоизделий в литье по выплавляемым моделям / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 4. – С. 9-12.
4. Сапченко, И. Г. Особенности проектирования пресс-форм в литье по выплавляемым моделям / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров // Литье и металлургия Белоруссии. – 2007. – № 1. – С. 93-95.
5. Математическое моделирование процессов получения полимерных моделей / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, М. В. Штерн // Литейное производство. – 2006. – № 1. – С. 31-32.
6. Салина, М. В. Влияние вакуумирования на физико-механические свойства и размерную точность выплавляемых моделей и отливок в литье по выплавляемым моделям / М. В. Салина, А. И. Евстигнеев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 55-60.



Марьин С. Б., Кирина А. В., Залесский К. В., Маценко В.В.
S. B. Maryin, A. V. Kirina, K. V. Zalessky, V. N. Maryin

ГИБКА ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛАСТОСЫПУЧИХ СРЕД

BENDING PARENT SHEET USING ELASTIC GRANULAR MEDIA

Марьин Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 7-914-177-87-55. E-mail: maryinsb@mail.ru

Mr. Sergey B. Maryin – Doctor of Engineering, Professor of the Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 681013, 27 Lenin Pr.; phone: +7 914 1778755. E-mail: maryinsb@mail.ru

Кирина Анна Валерьевна – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kalian86@mail.ru

Ms. Anna V. Kirina – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 681013, 27 Lenin Pr. E-mail: kalian86@mail.ru

Залесский Константин Владимирович – студент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kot5430@gmail.com

Mr. Konstantin V. Zalessky – student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 681013, 27 Lenin Pr. E-mail: kot5430@gmail.com

Маценко Вячеслав Викторович – аспирант Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: matsenkovv@mail.ru

Mr. Boris N. Maryin – Doctor of Engineering, Professor, Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 681013, 27 Lenin Pr. E-mail: maryinsb@mail.ru

Аннотация. Представлен способ деформирования листовых заготовок с применением универсальной эластичной штамповой оснастки.

Summary. The paper presents a method of deforming parent sheet by using a unified elastic medium press forming equipment.

Ключевые слова: штамповка, листовые заготовки, эластосыпучие среды.

Key words: press forming, parent sheet, elastic granular media.

УДК 621.983.073

В последние годы на первый план выходят задачи формообразования деталей самых разнообразных конструктивно-геометрических форм, в которых используются универсальные формообразующие элементы штамповой оснастки. В листоштамповочном производстве широкое применение нашла гибка в эластичную среду, показанная на рис. 1. Этот способ предпочтительнее других при частой сменяемости или модернизации объекта производства, требует меньше затрат на штамповую оснастку и позволяет значительно сократить сроки подготовки производства.

В этом отношении большой интерес представляют процессы гибки-формовки листовых заготовок давлением эластосыпучих сред.

Применение эластосыпучих сред позволяет:

- получить равномерное распределение усилия по всему объему сжимаемой среды;
- уменьшить усилие деформирования рабочего тела, благодаря возможности гранул перемещаться друг относительно друга;
- увеличить глубину внедрения заготовки в эластичную среду при формообразовании заготовки жестким пуансоном в эластичное тело;
- уменьшить количество эластичных инструментов (матриц-пуансонов), так как сыпучий материал может принимать любую форму, при этом исключить затраты на их изготовление.

Поэтому возникает необходимость в разработке новых решений при проектировании технологической оснастки, а также в применении новых материалов. При этом в качестве рабочего тела, деформирующего заготовку, могут быть использованы эластосыпучие среды, например наполнитель из гранулированного полиуретана марки ВИТУР Т-0433-85 или полиэтилен высокого давления (ГОСТ 16336-85).

В ходе проведения работ по проектированию эластичной матрицы была выявлена её оптимальная форма, показанная на рис. 2.

На рис. 3 приведена схема эластичной матрицы.

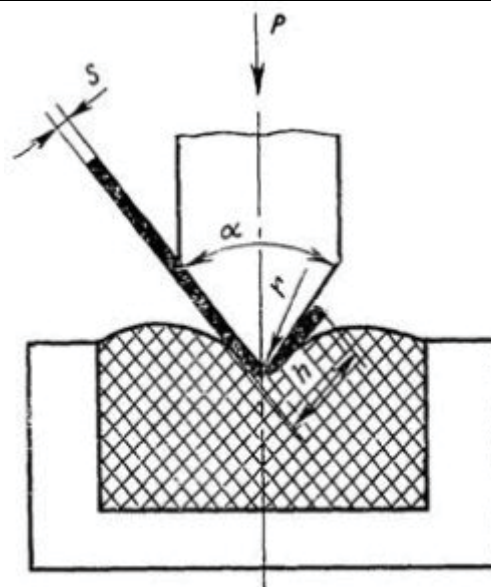


Рис. 1. Способ гибки в эластичную среду

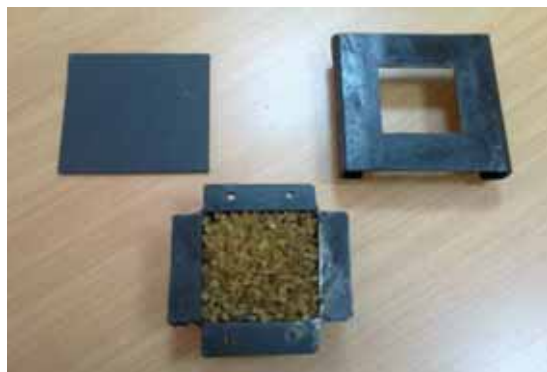


Рис. 2. Эластичная матрица

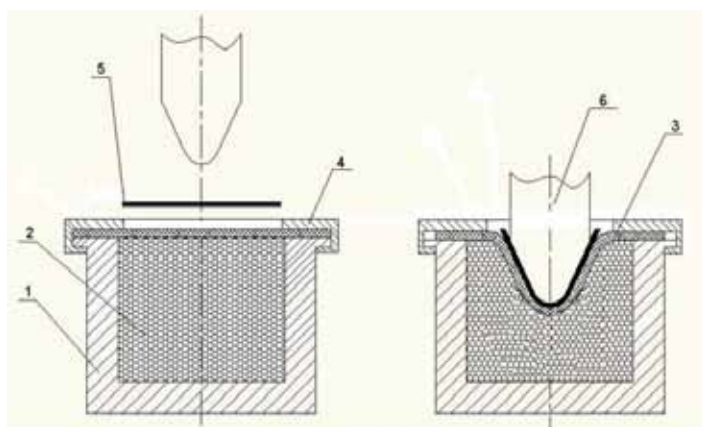


Рис. 3. Схема эластичной матрицы: 1 – контейнер; 2 – эластосыпучая среда; 3 – резина; 4 – крышка; 5 – листовая заготовка; 6 – пуансон

Эластичная матрица работает следующим образом. Сверху эластичной пластины размещается листовая заготовка. При перемещении ползуна пресса перемещается пуансон и происходит процесс формообразования листовой заготовки. Заготовка формируется под воздействием усилия пресса и давления со стороны эластичной пластины и эластичных гранул (см. рис. 4).

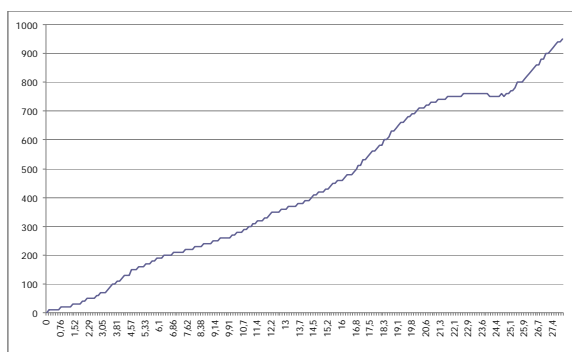


Рис.4. Гибка листовой заготовки в штампе

Данные, полученные во время эксперимента по гибке в эластосыпучую среду, показали, что усилие, требуемое для гибки листовой заготовки в 4 раза меньше, чем при традиционном способе гибки (см. рис. 5).

а)

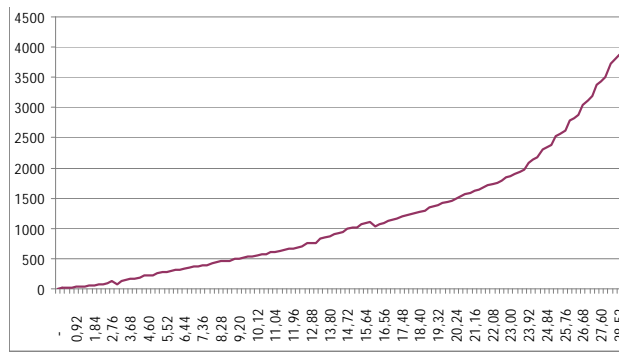
Р,Н



h,мм

б)

Р,Н



h,мм

Рис. 5. Усилия при гибке в гранулированный полиуретан (а), в резиновую подушку (б)

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение эластичных сред в листовой штамповке / С. Б. Марьин, А. И. Олейников, В. В. Куриный // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № II-1(2). – С. 105-109.
2. Пат. РФ № 82432. Универсальная эластичная матрица для штамповки листовых заготовок с нагревом / Марьин С.Б. – 2008148876/22. Заявл. 10.12.2008. Оpubл. 27.04.2009. Бюл. № 12.

Чижиумов С. Д., Каменских И. В.
S. D. Chizhiumov, I. V. Kamenskih

МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ВОЛН OWSC

MODELS OF OSCILLATING WAVE SURGE CONVERTERS



Чижиумов Сергей Демидович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: chizhium@rambler.ru
Mr. Sergey D. Chizhiumov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Shipbuilding, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur. E-mail: chizhium@rambler.ru.



Каменских Ираида Витальевна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: KS_kamen@knastu.ru
Ms. Iraida V. Kamenskih – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Shipbuilding, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur. E-mail: KS_kamen@knastu.ru

Аннотация. Отмечается актуальность проблемы перехода в энергетике прибрежных районов Дальнего Востока к использованию возобновляемых и экологически чистых источников энергии. Представлена опытная модель и математические модели динамики преобразователя типа OWSC в виде качающейся, шарнирно закреплённой пластины (створки). Приведены результаты расчётов. Показано влияние различных параметров динамической системы. Выполнена оценка эффективности преобразователя.

Summary. The urgency of transition to renewable and clean sources of energy in the Far East coastal regions is observed. We present an experimental model and mathematical simulations of the dynamics of an oscillating wave surge converter (OWSC) in the form of a hinged swinging plate (valve). The calculation results are provided. The effect of some parameters on the system dynamics is shown. The estimation of converter efficiency is made.

Ключевые слова: волновая электростанция, гидродинамика, численное моделирование, энергия, морские волны.

Key words: wave energy converter, hydrodynamics, numerical modelling, energy, sea waves.

УДК 620.92

Введение.

Основой нового, постиндустриального этапа развития человечества, обозначенного Э. Тоффлером как «Третья волна цивилизации», является концепция экологического развития, суть которой заключается в постепенном полном отказе от эксплуатации невозобновляемых источников энергии и переходе на технологии с малым потреблением ресурсов [5]. Это является единственным условием сохранения устойчивости экосистем и выживания человечества.

На Дальнем Востоке России районы, не подключенные к общей электрической сети, составляют большую часть территории. Энергетика Камчатской и Сахалинской областей базируется на привозном топливе: более 90 % электроэнергии производится на завозном мазуте. В связи с большими транспортными расходами стоимость выработки электроэнергии здесь превышает среднемировой показатель в 5 – 6 раз. Вместе с тем Дальний Восток обладает огромным потенциалом для развития экологически чистой энергетики (ветровой, приливной, волновой и др.). Для отдалённых прибрежных районов Камчатки, Сахалина и Курильских островов возможно применение электростанций небольшой мощности, использующих энергию морских волн.

Волновая энергия обладает более высокой по сравнению с ветром и солнцем плотностью энергии. Морские волны накапливают в себе энергию ветра на значительном пространстве разгона. Энергия волн имеет один из самых высоких показателей по практическому коэффициенту полезного действия среди нетрадиционных источников энергии [1; 2; 7].

Существует большое множество патентов волновых электростанций. В мире есть также много примеров практически реализованных проектов. Одним из наиболее эффективных типов волновых преобразователей является устройство в виде качающихся на волнах створок, шарнирно закрепленных в нижней части – Oscillating wave surge converter (OWSC). Примером его практической реализации является проект «Oyster» [6; 7; 8]. В работе представлены расчётные и опытные модели, а также анализ динамики преобразователя этого типа.

Экспериментальная модель преобразователя.

В качестве модели преобразователя волновой энергии рассмотрим конструкцию, представленную на рис. 1. Её основным элементом является шарнирно закреплённая пластина 1, подверженная воздействию волн. Отбор энергии волн осуществляется поршневым гидравлическим преобразователем 2. Кроме того, часть энергии волн расходуется на растяжение – сжатие эластичных связей (резиновых нитей) 3, а также на погружение элемента плавучести (поплавок) 4. Резинки 3 прикреплены к верхнему краю качающейся пластины и к неподвижным стержням 5.

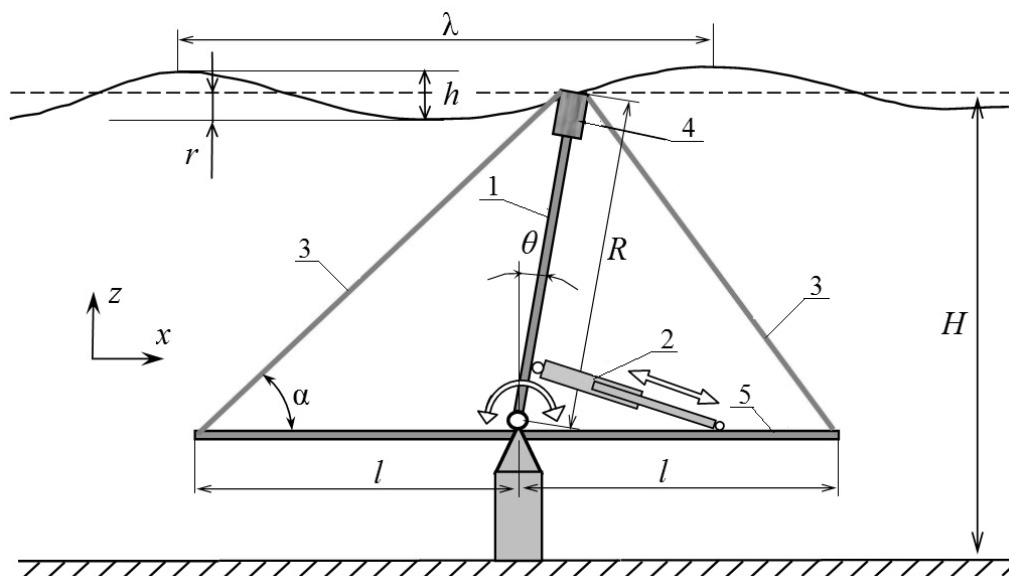


Рис. 1. Расчётная схема преобразователя энергии волн:
 1 – пластина; 2 – поршневой гидравлический преобразователь;
 3 – резиновые нити; 4 – поплавок; 5 – стержни

Соответствующая экспериментальная модель представлена на рис. 2. Она имеет следующие параметры: длина $L = 415$ мм; ширина пластины (радиус качания) $R = 205$ мм; длина стержней $l = 235$ мм; длина резиновых нитей $l_e = 335$ мм. Пластина изготовлена из пластика

толщиной 1,5 мм и плотностью 1,3 г/см³. Поплавок имеет: размеры 12×22×415 мм; плотность 0,5 г/см³. Резиновые нити имеют диаметр 2 мм.

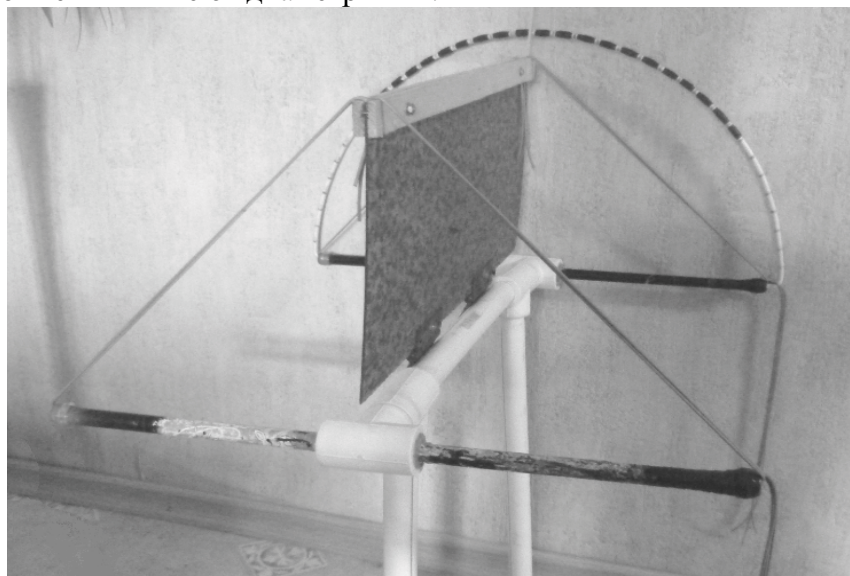


Рис. 2. Экспериментальная модель

Поплавок 4 и резиновые нити 3 обеспечивают возвращение пластины в вертикальное положение после наката волны. Демпфирование колебаний, а также нерегулярность волн и их несимметричный профиль, особенно проявляющийся в прибрежной зоне, приводят к тому, что пластина, не имеющая достаточный восстанавливающий момент в отклонённом положении, неизбежно стремится принять наклон в одну сторону.

Этот факт был замечен в экспериментах с пластиной, не имеющей эластичных связей 3. Даже при наличии поплавка 4 пластина при воздействии нескольких ветровых волн отклонялась в сторону берега и занимала положение примерно под углом 45° с небольшими отклонениями от этого положения.

Следует отметить, что в известной установке «Oyster» [6; 8] возврат рабочего органа (створки) в вертикальное положение обеспечивается силами плавучести. Для обеспечения достаточного восстанавливающего момента створка состоит из пяти весьма объёмных цилиндрических поплавков (см. рис. 3).

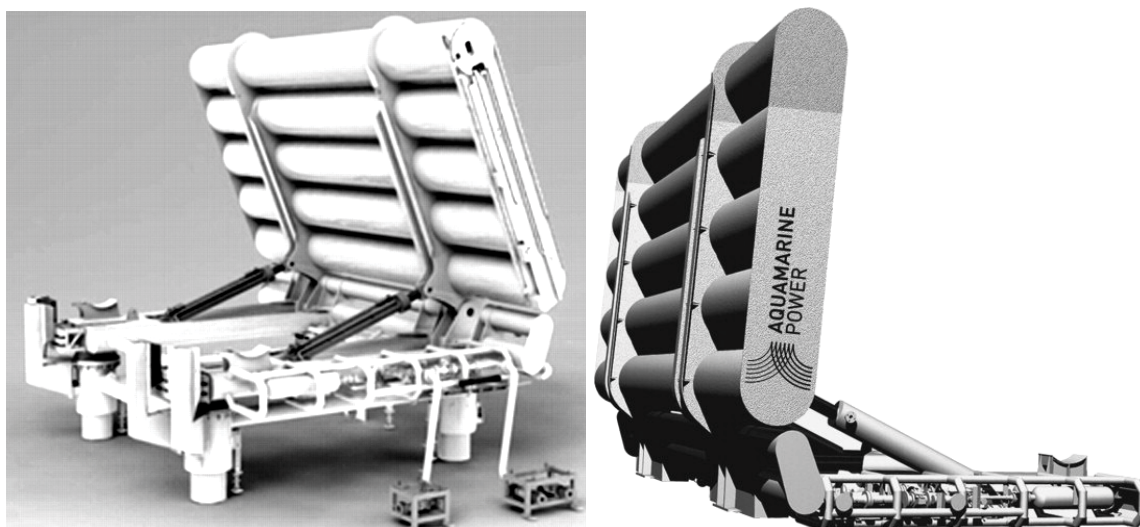


Рис. 3. Преобразователь энергии волн «Oyster»

В предлагаемом нами варианте волнового преобразователя введены эластичные элементы (резиновые нити), обеспечивающие дополнительный восстанавливающий момент. Элемент плавучести (поплавков) в этом случае имеет относительно небольшой объём. Резиновые нити 3 имеют нелинейную характеристику восстанавливающего момента. Она отличается от характеристики системы с поплавками.

Сочетание двух способов создания восстанавливающего момента позволяет подобрать оптимальную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) колебательной системы. Более того, оптимальную АЧХ можно обеспечить и без применения поплавков только за счёт регулирования жёсткости эластичных элементов, а также длины и углов наклона стержней 5 .

Линейная и нелинейная математические модели.

Приближённая аналитическая модель гармонических колебаний пластины описывается дифференциальным уравнением

$$(I_{yy} + i_{yy})\ddot{\theta} + (B_{yy} + b_{yy})\dot{\theta} + \left(m_b g R_b - m_p g \frac{R}{2} \right) \cdot \sin \theta + k_e \theta = \int_z p_w z dz, \quad (1)$$

где I_{yy} – погонный момент инерции пластины относительно шарнира; i_{yy} – присоединённый момент инерции жидкости (на единицу длины пластины); B_{yy} – коэффициент демпфирования устройства отбора мощности; b_{yy} – коэффициент волнового демпфирования; m_b и m_p – погонная масса поплавка и пластины; R_b – расстояние от центра тяжести поплавка до оси; k_e – коэффициент жёсткости резинок, приведенный к единице длины пластины; p_w – волновое давление.

Волновая нагрузка моделируется на основе линейной теории волн. В этом случае давление в волне определяется в виде

$$p_w(x, z, t) = \rho g r \cdot e^{kz} \sin(kx - \omega t),$$

где r – амплитуда волн; k – волновое число; ω – круговая частота.

Линейная модель колебаний предполагает малые углы отклонения пластины θ . Интегрирование давлений в уравнении (1) выполним по вертикальной оси. Учтём также, что $\sin \theta \approx \theta$. Тогда получим в точке $x = 0$:

$$I\ddot{\theta} + \beta\dot{\theta} + k\theta = M_a \sin \omega t, \quad (2)$$

где $I = I_{yy} + i_{yy}$; $\beta = B_{yy} + b_{yy}$; $k = m_b g R_b - m_p g R/2 + k_e$;

$$M_a = \rho g r \frac{e^{kR}}{k^2} \left(kR + \frac{1}{e^{kR}} - 1 \right).$$

Момент инерции пластины с поплавком определяется в виде

$$I_{yy} = m_p \left(\frac{R^2}{12} + \left(\frac{R}{2} \right)^2 \right) + m_b \left(\frac{c^2}{12} + \left(R - \frac{c}{2} \right)^2 \right),$$

где c – высота поплавка.

Присоединённый момент инерции определяется по формуле

$$i_{yy} = \pi \rho \frac{R^4}{8} \cdot k_{3D},$$

где k_{3D} – поправочный множитель, учитывающий пространственный характер обтекания пластины.

Коэффициент жёсткости резиновых нитей (считая малыми углами θ) на единицу длины

пластины L

$$k_e = \frac{M_e}{\theta L} = \frac{E \Delta l_e f l \sin \alpha}{l_e \theta L} = \frac{E f R l \sin \alpha \cos \alpha}{L \sqrt{R^2 + l^2}},$$

где M_e – момент реакции растяжения резинок; E – модуль упругости резины; f – площадь сечения резинок (с одной стороны от пластины); Δl_e – удлинение резинок; l_e – длина резинок.

Уравнение (2) можно переписать в виде

$$\ddot{\theta} + \nu_0 \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = W_a \sin \omega t,$$

где
$$\nu_0 = \frac{\beta}{I}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{I}}; \quad W_a = \frac{M_a}{I}.$$

Его решение:

$$\theta = \theta_a \sin(\omega t - \varepsilon),$$

где
$$\theta_a = \frac{W_a}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \nu_0^2 \omega^2}}; \quad \operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\nu_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

За один период колебаний $T = 2\pi/\omega$:

мощность системы:
$$P = \frac{1}{2} I \nu_0 \theta_a^2 \omega^2; \quad \text{работа: } A = \pi I \nu_0 \theta_a^2 \omega.$$

Данная математическая модель является приближённой. Для того чтобы она была практически применимой непосредственно, необходимо её уточнение путём согласования с экспериментальными данными. Основная проблема заключается в определении коэффициентов демпфирования, которые достоверно могут быть определены только путём экспериментального исследования декрементов затухания свободных колебаний. Факторами, ограничивающими применение линейной модели, также являются:

- существенные нелинейные эффекты при больших амплитудах колебаний, включающие геометрическую нелинейность и физические нелинейности, обусловленные несколькими причинами: большими деформациями упругих связей, вихревыми эффектами, перехлёстыванием вершин волн через пластину, переменной площадью смоченной поверхности пластины при прохождении впадин волн;

- сложности анализа колебаний на нерегулярном волнении, так как процесс колебаний фактически является неустановившимся (достоверность результатов спектрально-вероятностного анализа колебаний на волнах значительной амплитуды снижается, а кроме того, имеется проблема определения волнового спектра);

- отклонения реальной формы волн от гармонической (профиль и его изменение по фронту волны), особенно в прибрежной зоне.

Нелинейная модель гармонических колебаний пластины описывается дифференциальным уравнением (1). Перепишем его в виде

$$I \ddot{\theta} + \beta \dot{\theta} + k_m \sin \theta + k_e \theta = \int_z p_w z dz, \quad (3)$$

где
$$I = I_{yy} + i_{yy}, \quad \beta = B_{yy} + b_{yy}, \quad k_m = m_b g R_b - m_p g R / 2.$$

Присоединённый момент инерции определяется по формуле

$$i_{yy} = \pi \rho \frac{R^4}{8} \cdot k_{3D} \cdot k_\theta,$$

где $k_\theta = \cos^4 \theta$ – поправочный множитель, учитывающий угол наклона пластины.

Коэффициент жёсткости резинок на единицу длины пластины L

$$k_e = \frac{M_e}{|\theta|L} = \frac{E \Delta l_e f l \sin \alpha}{l_e |\theta|L} = \frac{E f l R \cos \theta}{|\theta|L} \cdot \frac{(l_e - l_{e0})}{l_e l_{e0}},$$

где l_e – длина резинок; l_{e0} – длина резинок при вертикальном положении пластины ($\theta = 0$):

$$l_e = \sqrt{R^2 \cos^2 \theta + (R |\sin \theta| + l)^2}; \quad l_{e0} = \sqrt{R^2 + l^2}.$$

Уравнение (3) можно переписать в виде

$$\ddot{\theta} + v_0 \dot{\theta} + \sigma_m \sin \theta + \sigma_e \theta = W(x, z, t), \quad (4)$$

где
$$v_0 = \frac{\beta}{I}; \quad \sigma_m = \frac{k_m}{I}; \quad \sigma_e = \frac{k_e}{I}; \quad W = \frac{1}{I} \int_z p_w z dz.$$

Уравнение (4) решалось методом Рунге-Кутты четвертого порядка с модификацией Фельберга.

Приведенная математическая модель, в отличие от линейной модели, учитывает нелинейную зависимость кренящих и восстанавливающих сил, обусловленных весом пластины и поплавок, а также существенную нелинейность упругих сил.

Характер нелинейной зависимости от влияния резиновых нитей можно эффективно регулировать путём изменения положения точек крепления нитей (наклоном стержней 5 к оси x под углом γ).

Тогда восстанавливающий момент упругих сил M_{eL} , который в этом случае заменяет слагаемое $k_e \theta$ в уравнении (1), выражается формулой

$$M_{eL} = \frac{M_e}{L} = \frac{E(l_e - l_{e0})f r}{l_e L},$$

где
$$l_{e0} = \sqrt{(R - b)^2 + a^2}, \quad a = l \cdot \cos \gamma, \quad b = l \cdot \sin \gamma,$$

если $\psi = (90^\circ - \gamma + \theta) \geq 90^\circ$:

$$l_e = \sqrt{(R + b_1)^2 + a_1^2}, \quad a_1 = l \cdot \cos(\psi - 90^\circ), \quad b_1 = l \cdot \sin(\psi - 90^\circ),$$

если $\psi < 90^\circ$:

$$l_e = \sqrt{(R - b_1)^2 + a_1^2}, \quad a_1 = l \cdot \cos(90^\circ - \psi), \quad b_1 = l \cdot \sin(90^\circ - \psi),$$

$$r = \frac{2}{l_e} \sqrt{p(p - l_e)(p - R)(p - l)}, \quad p = \frac{1}{2}(R + l + l_e).$$

Результаты расчётов.

Собственная частота колебаний системы зависит от количества резиновых нитей с каждой стороны пластины n : $n = 1$: $\omega_0 = 1,01$ 1/с; $n = 2$: $\omega_0 = 1,486$ 1/с; $n = 3$: $\omega_0 = 1,84$ 1/с; $n = 4$: $\omega_0 = 2,14$ 1/с; $n = 5$: $\omega_0 = 2,4$ 1/с.

Результаты экспериментов позволили оценить достоверность расчётов по математическим моделям. Так, при $n = 2$ ($\omega_0 = 1,486$ 1/с), средней частоте волнения 5,87 1/с, сопротивлении $\beta = 1,2$ Н·с/рад и амплитуде волн 33,5 мм, рассчитанная амплитуда раскачки составляет: по линейной модели – 20° , по нелинейной модели – $13,5^\circ$. В соответствующих опытах средний угол отклонения при накате волн составляет 16° , а при откате волн – $10,75^\circ$ (осреднённое значение: $13,4^\circ$).

На рис. 4 – 5 представлено соотношение амплитуд угловых перемещений системы,

полученных в расчётах в нелинейной и линейной постановках: $\theta_a^{нелин} / \theta_a^{лин}$. Результаты приведены для волн амплитудой 67 мм для двух вариантов коэффициента сопротивления β и для двух вариантов жёсткости эластичных элементов (определяемой количеством резинок n с каждой стороны пластины на длине L).

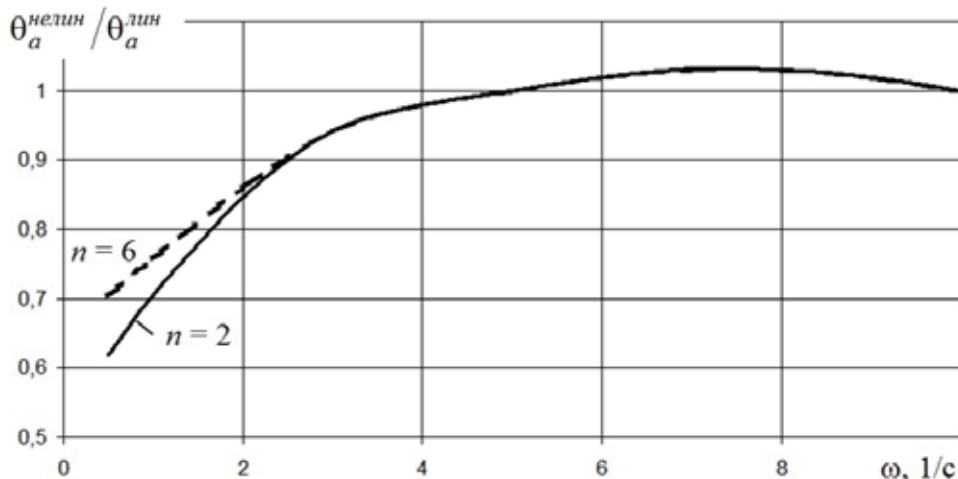


Рис. 4. Пример влияния нелинейности уравнения (3) на результаты расчётов при $\beta = 7$ Н·с/рад

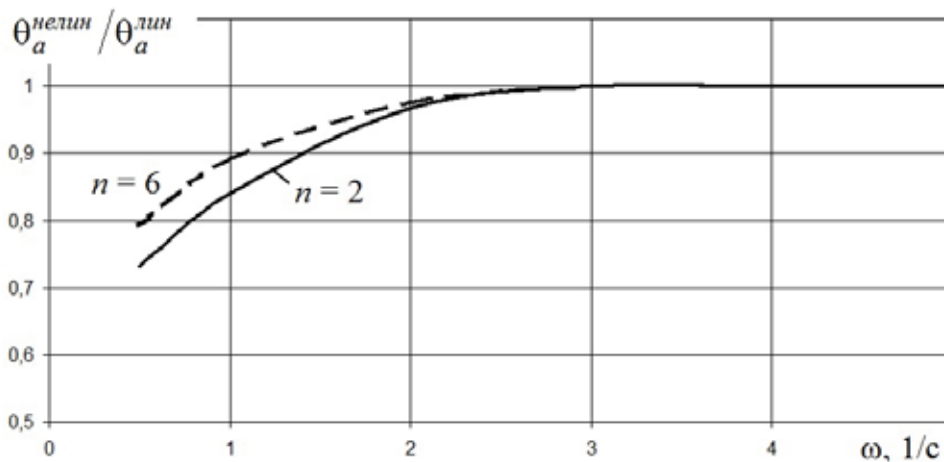


Рис. 5. Пример влияния нелинейности уравнения (3) на результаты расчётов при $\beta = 15$ Н·с/рад

Результаты расчётов показали, что влияние нелинейности системы возрастает: с уменьшением частоты волн, с уменьшением жёсткости системы, с уменьшением коэффициента сопротивления.

На рис. 6 – 7 представлены полученные расчётом АЧХ $\theta_a(\omega)$ нелинейной модели при разных значениях жёсткости эластичных элементов, амплитуды волн и общего коэффициента сопротивления.

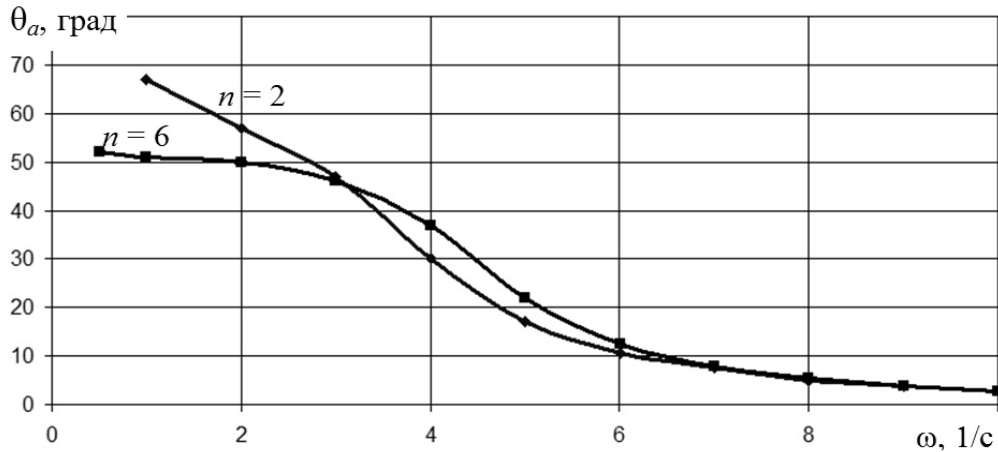


Рис. 6. АЧХ системы при разном количестве резиновых нитей n .
Расчетная амплитуда волны $r = 33,5$ мм; $\beta = 2$ Н·с/рад

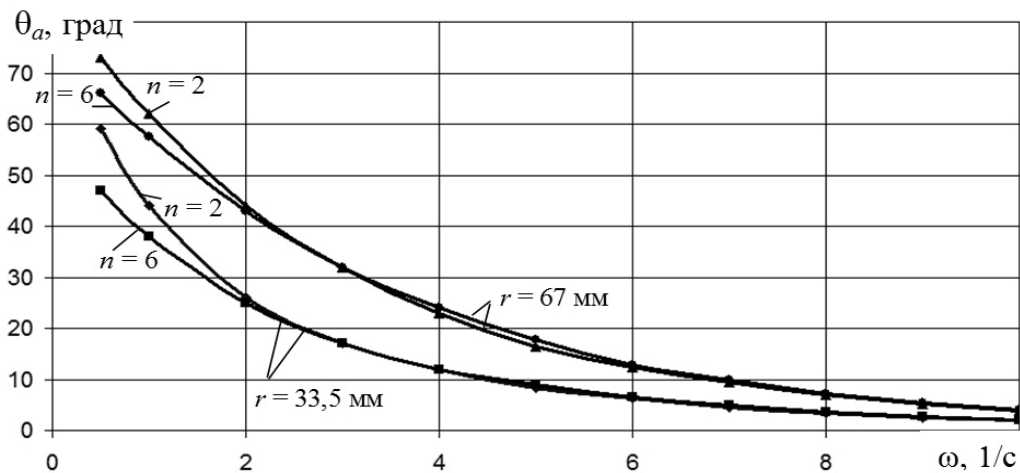


Рис. 7. АЧХ системы при разных значениях амплитуды волн и жесткости упругих элементов. Коэффициент сопротивления $\beta = 7$ Н·с/рад

На рис. 8 – 9 показано изменение к.п.д. установки от жёсткости эластичных элементов и частоты волн при сопротивлении устройства отбора мощности $B_{yy} = 0,8$ Н·с/рад и $B_{yy} = 5,8$ Н·с/рад.

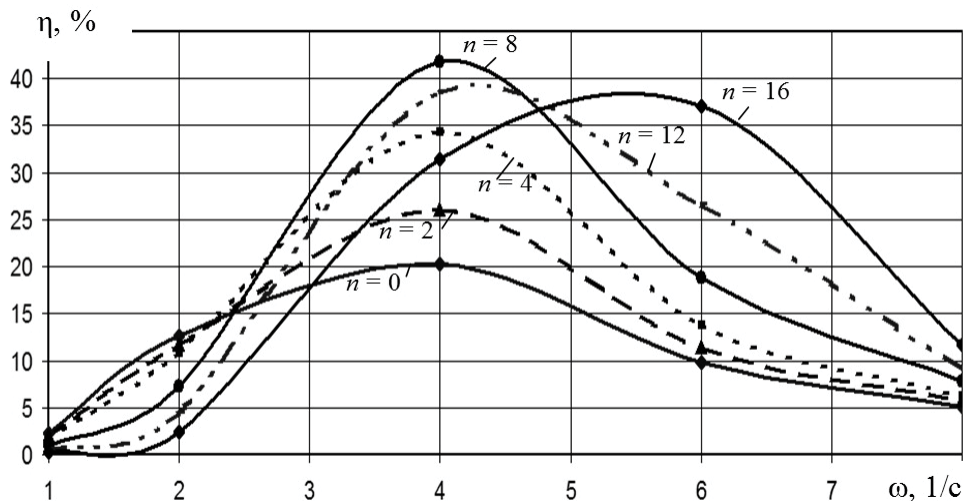


Рис. 8. Зависимость к.п.д. установки от частоты волн и жёсткости эластичных элементов при полезном сопротивлении $B_{yy} = 0,8$ Н·с/рад

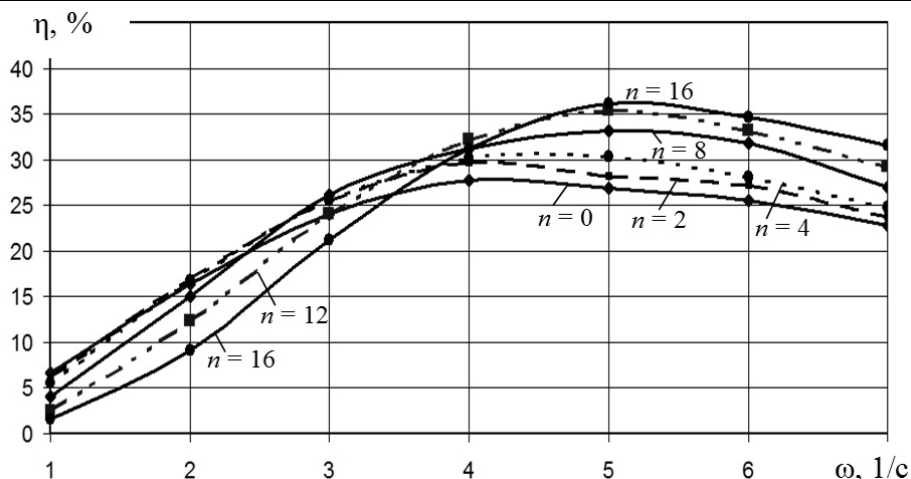


Рис. 9. Зависимость к.п.д. установки от частоты волн и жёсткости эластичных элементов при полезном сопротивлении $B_{yy} = 5,8 \text{ Н}\cdot\text{с/рад}$

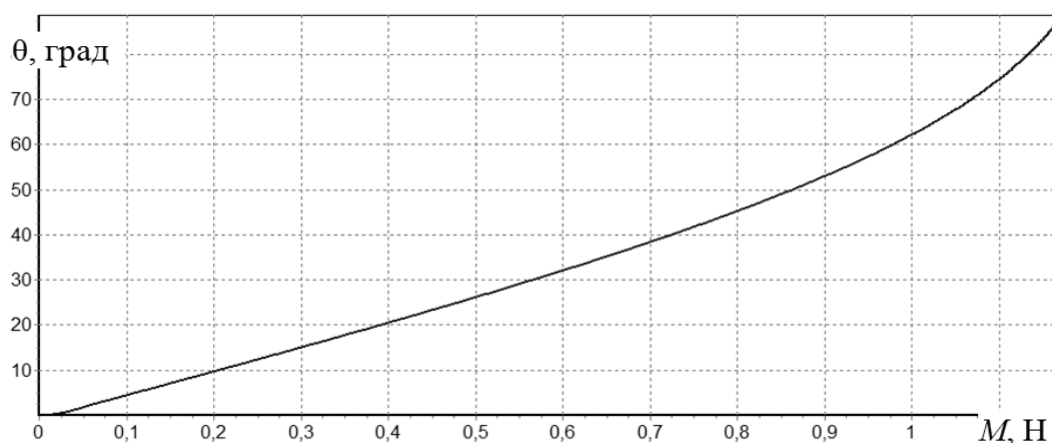
Следует отметить довольно широкий диапазон частот и полезного сопротивления, соответствующий стабильным значениям к.п.д. от 25 до 40 %. Подбором жёсткости эластичных элементов можно добиться оптимальных значений к.п.д. в широком диапазоне частот.

Для более наглядного представления особенностей работы модели преобразователя приведём дополнительные иллюстрации.

Примеры отклонений пластины при статическом нагружении.

На рис. 10 приведены зависимости углов отклонения пластины от прилагаемого статического момента M (на единицу ширины пластины) при $\beta = 1,2 \text{ Н}\cdot\text{с/рад}$. Видно, что резиновые нити способствуют существенной нелинейности системы на больших углах отклонений. Поплавки формируют слабую нелинейность системы. Кроме того, характер нелинейной зависимости от влияния резиновых нитей можно эффективно регулировать путём изменения наклона стержней 5 (см. рис. 1).

а)



б)

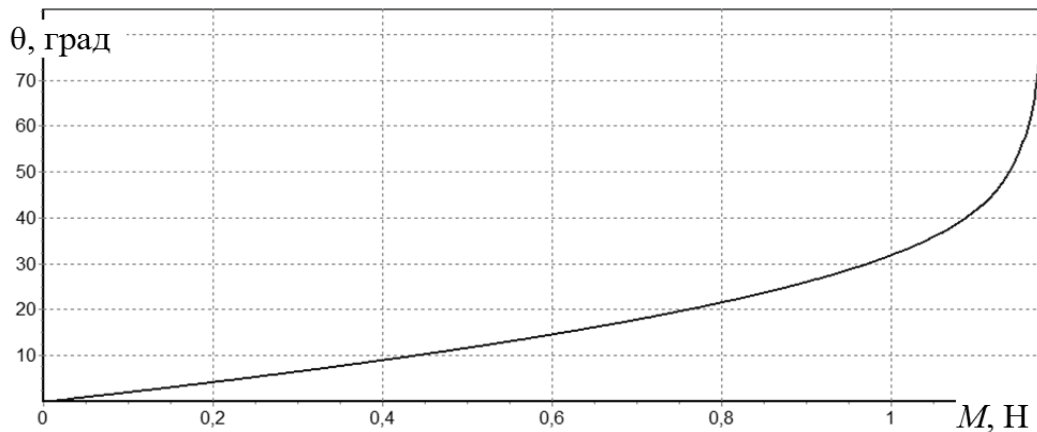


Рис. 10. Зависимость углов отклонения пластины от прилагаемого статического момента:

а – площадь сечения поплавка $f_{плав} = 10,6 \text{ см}^2$, $n = 0$; б – $f_{плав} = 2,64 \text{ см}^2$, $n = 2$

Примеры временных зависимостей.

На рис. 11 – 12 представлены свободные затухающие колебания (углы и угловые скорости) от импульсного момента продолжительностью 0,5 с. Коэффициент демпфирования $\beta = 1,2 \text{ Н·с/рад}$. Видно, что регулировка жесткости эластичных элементов позволяет управлять собственными частотами системы в большем диапазоне, чем изменением плавучести.

На рис. 13 представлены вынужденные колебания (углы и угловые скорости) при амплитуде волны 1 см, частоте 10 1/с и общем сопротивлении $\beta = 2 \text{ Н·с/рад}$. Из этого рисунка видно, что при отсутствии упругих элементов и существенном сопротивлении, колебания пластины длительное время несимметричны. Колебания происходят относительно отклонённого положения пластины. И только через несколько десятков циклов колебания устанавливаются относительно состояния равновесия. Очевидно, что при нерегулярном волнении, особенно на волнах с более крутым передним склоном, эта несимметричность колебаний будет только увеличиваться. Это может привести к существенному уменьшению размаха колебаний.

Добавление упругих элементов позволяет быстро привести колебательный процесс к симметричному виду. Кроме того, регулированием жесткости упругих элементов можно настроить колебания на резонансный режим.

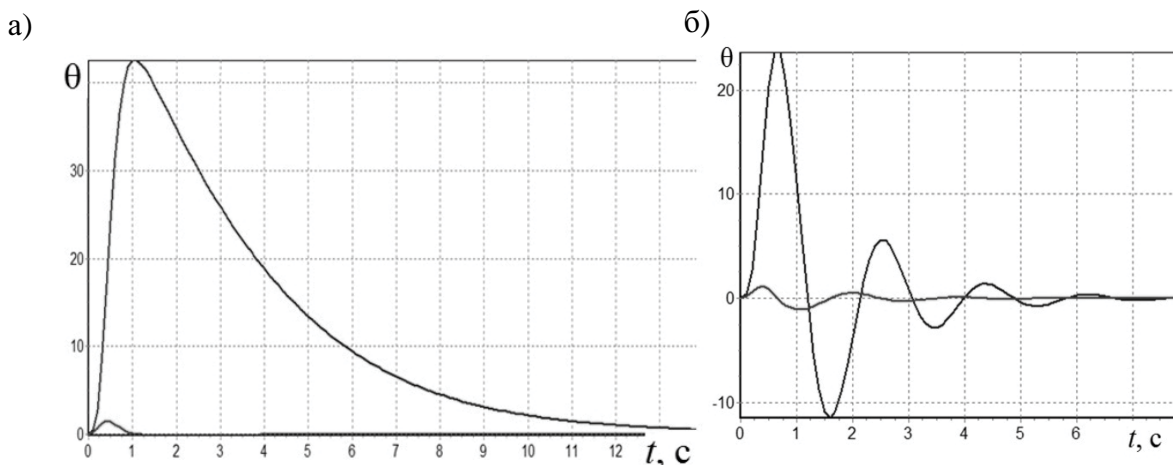


Рис. 11. Затухание свободных колебаний при разной жёсткости упругих элементов ($\beta = 1,2 \text{ Н·с/рад}$):

а – $n = 0$; б – $n = 8$

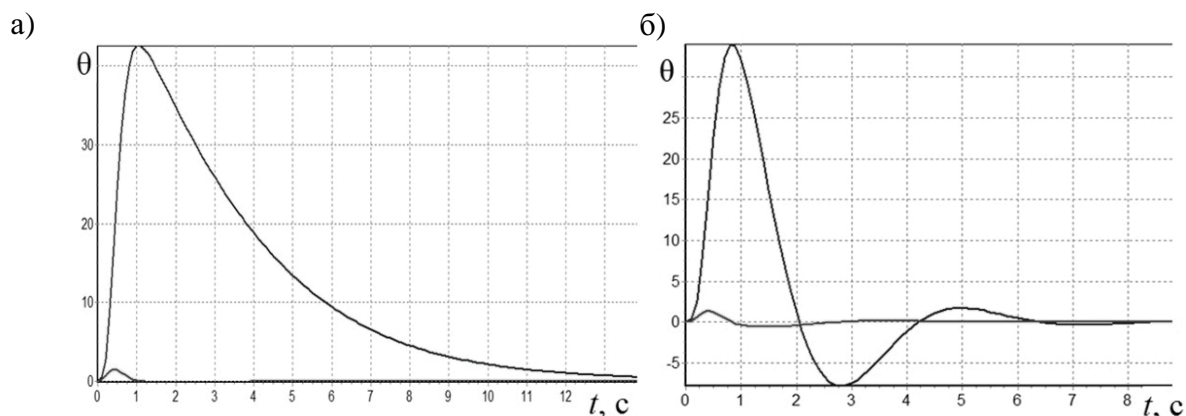


Рис. 12. Затухание свободных колебаний при разной площади сечения поплавка ($\beta = 1,2 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{рад}$, $n = 0$):
 а – $f_{\text{плав}} = 2,75 \text{ см}^2$; б – $f_{\text{плав}} = 22 \text{ см}^2$

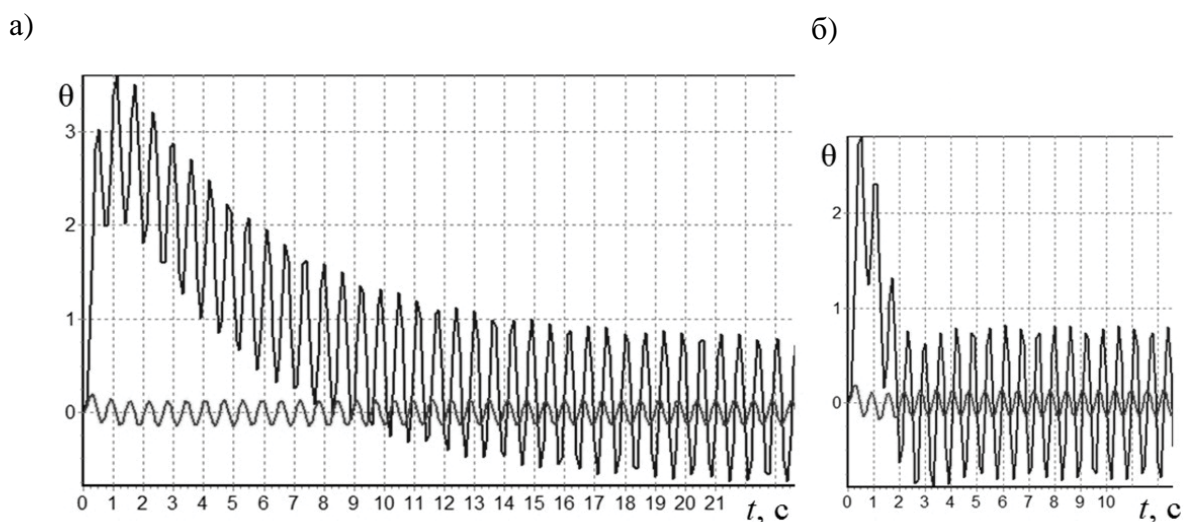


Рис. 13. Вынужденные колебания при амплитуде волны 1 см; частоте 10 1/с и $\beta = 2 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{рад}$:
 а – $n = 0$; б – $n = 2$

Заключение.

Основными результатами проделанной работы являются: нелинейная математическая модель преобразователя энергии волн и оценка эффективности преобразователя. Результаты расчётов согласуются с опытными данными. Выявлены особенности работы рассмотренной динамической системы при различных параметрах, определяющих восстанавливающие и демпфирующие силы.

Показано, что влияние нелинейности системы возрастает: с уменьшением частоты волн, с уменьшением жёсткости системы, с уменьшением коэффициента сопротивления. При малой жёсткости системы её колебания на регулярном волнении в начальной фазе имеют нестационарный характер относительно отклонённого положения пластины. Введение в систему эластичных связей вместо поплавков (или в дополнение к ним) позволяет более эффективно настроить преобразователь на работу в оптимальном режиме.



ЛИТЕРАТУРА

1. Волновые энергетические станции в океане / В. И. Сичкарев, В. А. Акуличев. – М.: Наука, 1989. – 132 с.
2. Коробков, В. А. Преобразование энергии океана / В. А. Коробков. – Л.: Судостроение, 1986. – 279 с.
3. Чижиумов, С. Д. Преобразование энергии морских волн // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № III-1(3). – С. 16-24.
4. Чижиумов, С. Д. Возможность использования энергии морских волн на дальневосточном побережье / С. Д. Чижиумов, И. В. Каменских, О. В. Трубецкая // Мореходство и морские науки-2011: избранные доклады Второй Сахалинской региональной морской науч.-техн. конф. (15-16 февраля 2011 г.). – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2011.
5. Тоффлер, Э. Третья волна / Э. Тоффлер. – М.: ООО «Фирма «Издательство АСТ»». – 1999. – С. 6-261.
6. Cameron L., Doherty R., Henry A., Doherty K., Van't Hoff J., Kaye D. and Naylor D., Bourdier S., Whittaker T. Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter 3rd International Conference on Ocean Energy, 6 October, Bilbao, 2010. – pp. 1-11.
7. T.J.T. Whittaker & M. Folley, (2005): 'Optimisation of wave power devices towards economic wave power systems', World Renewable Energy Congress, Aberdeen, UK, 2005. – pp. 927-932.
8. Whittaker T., Folley M. Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster / Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2011. – pp. 345-364.

Воронова В. В.
V. V. Voronova

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РИСКА ТРАВМАТИЗМА В ОРГАНИЗАЦИЯХ
НЕПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СФЕРЫ**

INJURY RISK PROJECTION AT NON-MANUFACTURING ORGANIZATIONS



Воронова Валентина Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: alvival@rambler.ru

Ms. Valentina V. Voronova – PhD in Engineering, Senior Lecturer, Department of "Health and Safety Studies", Komsomol-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur. E-mail: alvival@rambler.ru

Аннотация. В статье рассмотрены результаты анализа производственного травматизма в организациях непромышленной сферы, приведены прогнозные оценки уровня травматизма, определены группы риска персонала.

Summary. The paper considers the results of the analysis of occupational injuries at a non-manufacturing organization; a predicted estimate of the rate of industrial incidents is offered, risk groups among the company's personnel are identified.

Ключевые слова: прогнозирование, риск, травматизм.

Key words: estimate, risk, injuries.

УДК 331.45

Актуальностью прогнозирования травматизма является выявление закономерностей изменения и конкретной величины статистических показателей в будущем, а также определение неблагоприятных тенденций основных показателей, требующих принятия плановых решений.

Целью работы является анализ и прогнозирование травматизма в организациях непромышленной сферы. В качестве объекта исследования выбрано одно из территориальных Управлений федеральной службы исполнения наказания России (далее Управление).

Основными исходными данными для анализа и прогнозирования травматизма являлись: журнал учета несчастных случаев, данные отдела кадров.

Управление контролирует деятельность подотчетных ему учреждений на подведомственной территории, таких как исправительные колонии, следственные изоляторы, колонии поселения.

Анализ состояния производственного травматизма проводился в период с 2005 по 2010 гг. За анализируемый период произошло 125 несчастных случаев, в том числе 11 групповых случаев, пострадало 207 человек (см. рис. 1). Наибольшее количество несчастных случаев в управлении произошло в 2010 г.

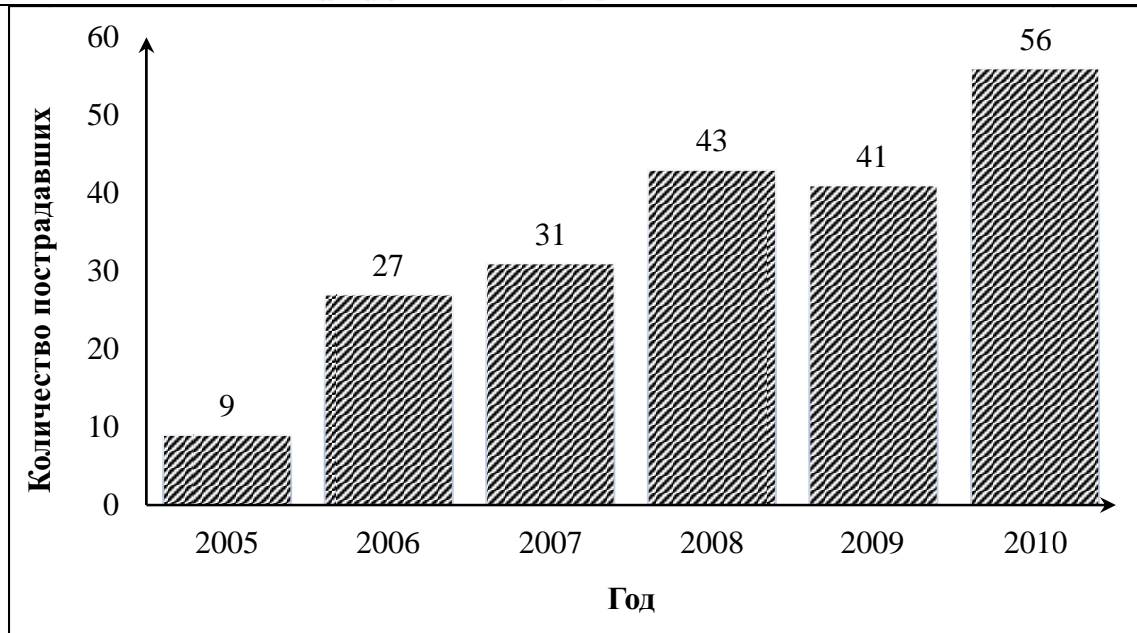


Рис. 1. Динамика травматизма

Результаты расчета риска травматизма представлены в графической форме. Как видно из рис. 2, наиболее высокий уровень риска пришелся на последние годы, минимальный риск отмечался в 2005 г. Среднегодовой уровень риска (R_{cp}) составил 167 на 1000 человек.

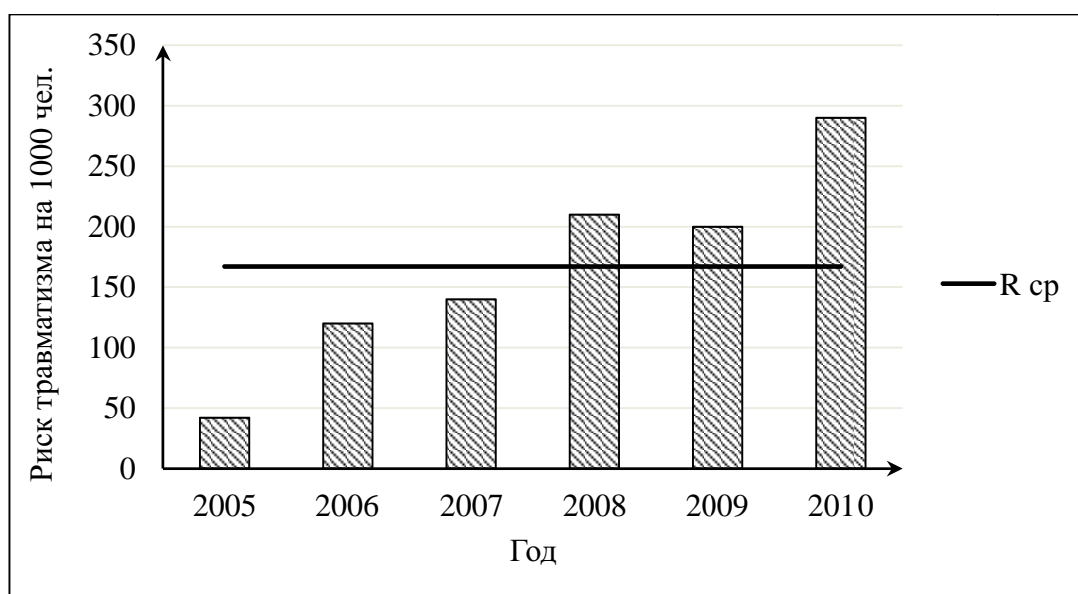


Рис. 2. Уровень риска производственного травматизма

В работе выполнен прогноз риска травматизма на ближайшие 3 года на основе линии тренда. Для ожидаемого и сравнительного прогноза травматизма линия тренда строилась пятью способами. Величину надежности построенного тренда показывает величина достоверности аппроксимации. Из табл. 1 видно, что наиболее достоверной моделью является степенный тип линии тренда.

Таблица 1

Уравнения тренда для прогноза

Тип линии тренда	Уравнение тренда	R^2	Точности аппроксимации
Линейный	$Y = 44,286 * x + 12$	0,9370	Удовлетворительная
Логарифмический	$Y = 123,38 * \ln(x) + 31,714$	0,9123	Удовлетворительная
Экспоненциальный	$Y = 44,871 * e^{0,3314x}$	0,8384	Удовлетворительная
Полиномиальный	$Y = -1,0714 * x^2 + 51,786 * x + 2$	0,9381	Удовлетворительная
Степенный	$Y = 47,958 * x^{0,9971}$	0,9522	Высокая

По степенному уравнению тренда рассчитан прогноз травматизма на ближайшие 3 года (см. рис. 3). Анализируя график, видно, что существует вероятность дальнейшего роста уровня травматизма. Однако изучение причин и обстоятельств травматизма показало, что можно добиться его снижения за счет простых и малозатратных мер.

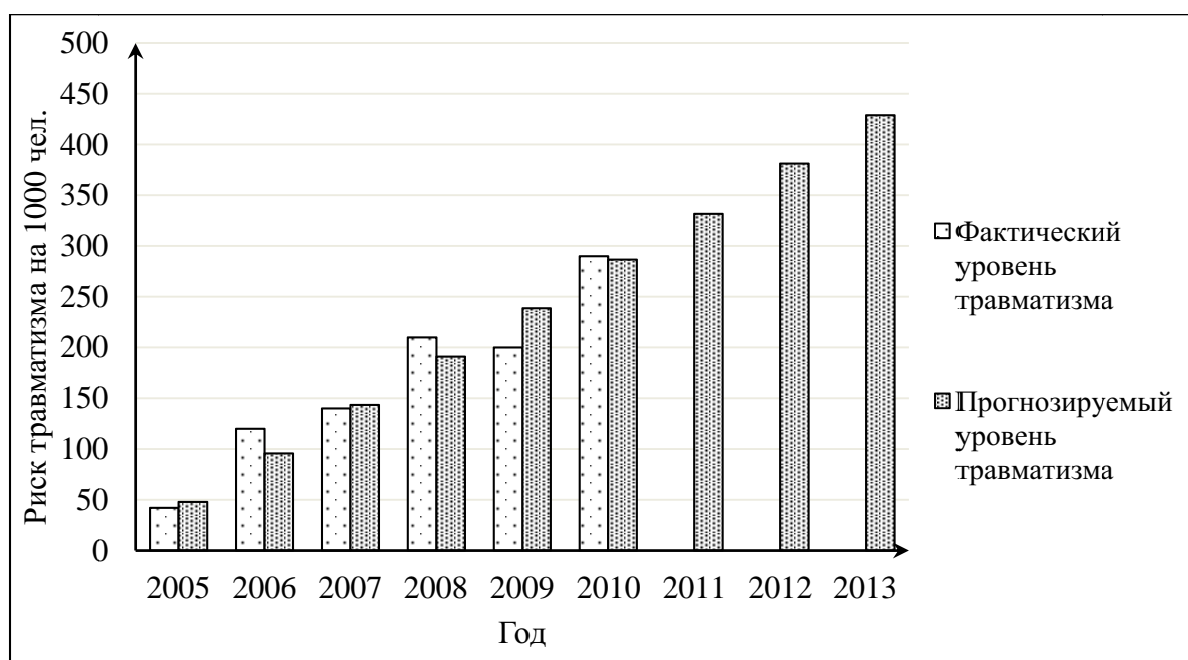


Рис. 3. Фактическое и прогнозное значение уровня риска травматизма

Анализ по виду происшествий показал, что 64 % несчастных случаев произошло из-за падения работников, причем большинство пострадавших по этой причине – женщины (64,7 % из числа всех пострадавших по причине падения).

Изучение обстоятельств, при которых произошли подобные случаи, выявило следующие причины падений: неудовлетворительное состояние мест пребывания и перемещения персонала, невнимательность сотрудников, несоблюдение мер безопасности, нарушение форменной одежды.

Для исключения случаев травматизма по причине падения в Управлении следует выполнить следующие простейшие мероприятия:

- изменить график уборки помещений управления, а именно: не осуществлять уборку холла и лестничных маршей в утреннее время;
- в холле и на лестничных маршах административного здания постелить нескользящее покрытие;



- перед входом в административное здание постелить нескользящее покрытие;
- ужесточить контроль за правильным ношением форменной одежды.

В работе проведен анализ травматизма по отдельным группам (по полу, возрасту, стажу работы) в абсолютных значениях и при расчете на 1000 человек (см. табл. 2).

Таблица 2

Структура пострадавших от несчастных случаев в Управлении
за период с 2005 по 2010 гг.

Показатель	Количество пострадавших	
	чел.	при расчете на 1000 работающих
<i>Пол</i>		
мужчины	112	147
женщины	95	194
<i>Возраст</i>		
до 25 лет	5	38
от 25 до 35 лет	102	288
от 35 до 45 лет	65	126
от 45 до 55 лет	35	249
<i>Стаж работы</i>		
до 5 лет	68	476
от 5 до 10 лет	45	211
от 10 до 15 лет	51	165
от 15 до 20 лет	27	159
от 20 до 25 лет	10	18
от 25 до 30 лет	4	18,5
свыше 30 лет	2	31

Анализ травматизма при расчете на 1000 человек выявил, что по половой принадлежности наиболее подвержены травматизму женщины, по возрасту – категория персонала от 25 до 35 лет, по стажу – категория персонала со стажем работы до 5 лет.

В работе определен персонифицированный риск для группы персонала численностью 15 человек. Смысл работы заключается в том, что можно прогнозировать индивидуальный риск травматизма для каждого работника как сумму известных из ретроспективного анализа рисков травматизма групп, к которым принадлежит человек. Данный метод исследования применён в работах [1 – 3]. Информация для целей исследования преобразована и представлена в табл. 3. Фамилии членов группы закодированы в порядковые номера 01...15.

Таблица 3

Данные персонала для определения индивидуального риска

Код, №	Стаж	Возраст	Пол	Код, №	Стаж	Возраст	Пол
001	34	54	муж	009	12	46	муж
002	21	46	муж	0010	16	43	муж
003	26	52	муж	0011	10	41	муж
004	19	48	жен	0012	35	54	муж
005	20	50	муж	0013	27	50	жен
006	22	47	муж	0014	20	48	муж
007	17	45	муж	0015	16	43	жен
008	31	53	жен				

Прогнозирование индивидуального риска проводим исходя из предположения, что в будущем у персонала, обладающего соответствующими признаками (профессия, пол, возраст, стаж), риск травматизма будет таким же, как в ретроспективе.

Расчет индивидуальных рисков проводился с применением модифицированного вероятностного метода Байеса (метода нормированных интенсивных показателей) и методом экспертных оценок. В качестве экспертов выбраны специалисты, хорошо знающие специфику деятельности Управления. Согласованность мнений экспертов оценивалась с помощью коэффициента конкордации, который в нашем случае оказался равен 0,7. Это свидетельствует о наличии высокой степени согласованности мнений экспертов.

Сравнивая полученные результаты прямого анализа исходных данных и их «сглаживания» с помощью метода Байеса и метода экспертных оценок, наибольшее значение риска имеет линия без учета корректирующих коэффициентов, наименьшее – метод нормированных интенсивных показателей (см. табл. 4).

Таблица 4

Сопоставление результатов расчета индивидуального риска

Индивидуальный риск					
Прямой метод		Метод нормированных интенсивных показателей		Метод экспертных оценок	
Код	R _п	Код	R _{прогн}	Код	R _{п/эк.}
004	834,90	004	23,50	004	207,33
009	793,19	009	22,33	009	200,27
002	736,80	002	20,74	002	185,61
005	736,80	005	20,74	005	185,61
006	736,80	006	20,74	006	185,61
0014	736,80	0014	20,74	0014	185,61
0015	712,14	0015	20,04	0015	185,23
008	707,15	008	19,90	0011	178,17
0013	694,42	0013	19,55	007	176,72
0011	670,43	0011	18,87	0010	176,72
007	664,86	007	18,71	008	174,11
0010	664,86	0010	18,71	0013	170,80
001	659,87	001	18,57	001	165,60
0012	659,87	0012	18,57	0012	165,60
003	647,14	003	18,21	003	162,29

В данной работе предпочтение отдано методу экспертных оценок, так как опыт, понимание существа проблемы, чувство интуиции помогают специалистам в ситуации неопределенности оценить значимость альтернативных исходов, принимать рациональные решения.

На основе полученных прогнозируемых индивидуальных данных для персонала методом экспертных оценок были сформированы группы риска персонала (см. рис. 4).

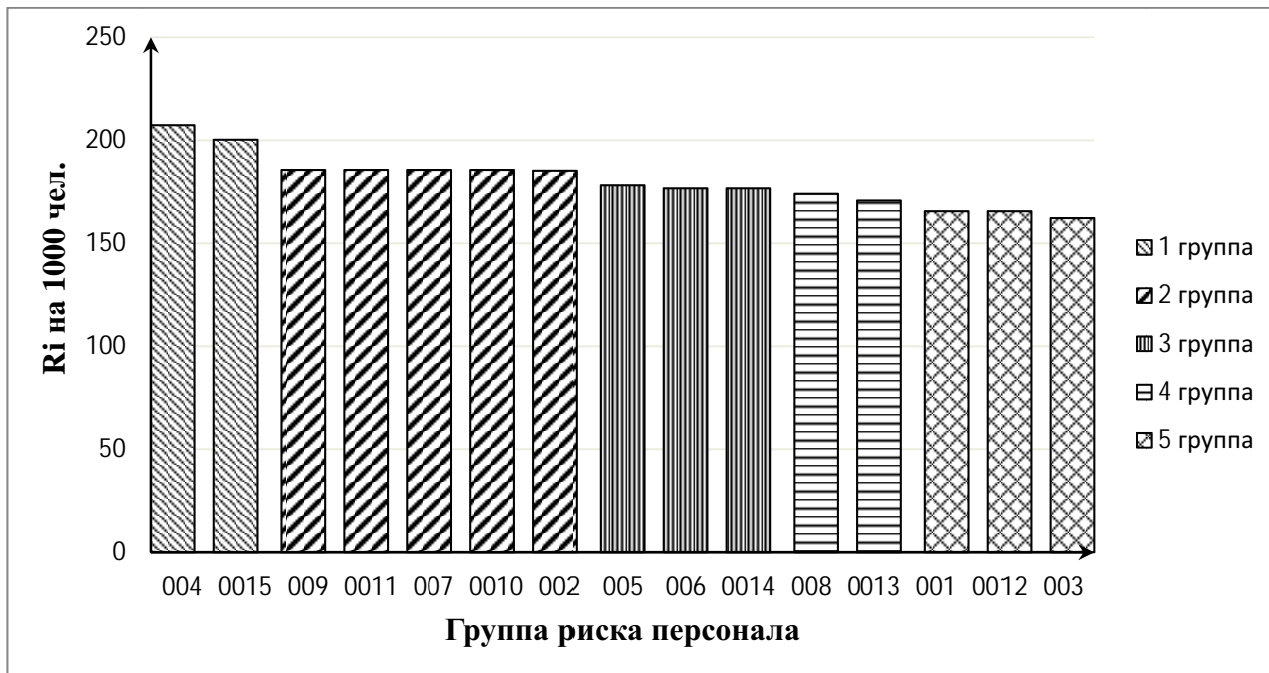


Рис. 4. Распределение персонала по группам риска

На кривой распределения в порядке убывания прогнозируемого индивидуального риска персонал выделен по группам примерно с равным уровнем риска.

Как следует из полученных данных, весь персонал из дополнительно исследованной группы в 15 человек требует повышенного внимания в плане их обучения в области безопасности и контроля за безопасным выполнением работ.

На основании проведенных исследований предложены рекомендации по снижению травматизма в Управлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанова, И. П. Математико-статистические методы анализа и прогнозирования травматизма на ОАО «Амурметалл» / И. П. Степанова, И. Д. Осколова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № III-1(7). – С. 104-117.
2. Степанова, И. П. Алгоритм прогнозирования риска травматизма на основе ретроспективного анализа / И. П. Степанова, А. О. Смирнов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике – 2010. – № III – 1(3). – С. 112-121.
3. Воронова, В. В. Анализ нарушений персоналом требований нормативно-технических документов на основе применения специальных показателей / В. В. Воронова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № II-1(6). – С. 101-107.

Степанова И. П., Красильникова С. Д.

ОЦЕНКА КАНЦЕРОГЕННОГО РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ХРАНЕНИИ ТВЁРДЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Степанова И. П., Красильникова С. Д.

I. P. Stepanova, S. D. Krasilnikova

**ОЦЕНКА КАНЦЕРОГЕННОГО РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ
В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ
ПРИ ХРАНЕНИИ ТВЁРДЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ**

**ASSESSMENT OF CANCER RISK TO THE HEALTH OF POPULATION DUE TO
CHEMICAL IMPACT PRODUCED IN CONSEQUENCE OF SOLID GALVANIC WASTE
STORAGE**

Степанова Ирина Павловна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-914-179-29-10. E-mail: Prof.Stepanova@mail.ru.

Ms. Irina P. Stepanova – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Health and Safety Studies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 681013, 27 Lenina Ave., phone: +7 914 1792910. E-mail: prof.stepanova@mail.ru

Красильникова Светлана Дмитриевна – начальник очистных сооружений Открытого акционерного общества «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение имени Ю.А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская, 1. E-mail: sdkr1@mail.ru.

Ms. Svetlana D. Krasilnikova – director of wastewater treatment facilities of OJSC "Yuri Gagarin Komsomolsk-on-Amur Aircraft Building Plant", Russia, Komsomolsk-on-Amur, 681018, 1 Sovetskaya Str. E-mail: sdkr1@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрен анализ загрязнения окружающей среды в результате хранения твёрдых гальванических отходов на специально оборудованной площадке. Выполнена оценка риска для здоровья населения. Произведено сравнение с критерием приемлемости рисков.

Summary. The paper considers the assessment of environmental pollution caused as a result of storing solid galvanic waste in a specially equipped site. Assessment of risk for the health of population is made. A comparison with the risk acceptance criteria is made.

Ключевые слова: гальванические отходы, загрязнение почв, концентрация, химическое вещество, тяжелые металлы, канцерогенный риск, доза, фактор экспозиции, фактор наклона.

Key words: galvanic waste, soil contamination, concentration, chemical substance, heavy metals, carcinogenic risk, dose, exposure factor, slope factor.

УДК 331.45

Введение. В работах [1; 2] мы уже поднимали тему оценки риска здоровью населения г. Комсомольска-на-Амуре от действия химических веществ. Настоящая статья посвящена исследованию возможного действия на население города химических веществ от склада гальваношламов Комсомольского-на-Амуре авиационного производственного объединения.

На ОАО «КнААПО» с 1992 г. организован сбор гальваношламов в контейнерах на специально оборудованной площадке по видам: кислотно-щелочные, хромистые, цианосодержащие. Ежегодно на объединении образуется около 40 т гальваношламов. В 2009 г. на свободных площадях очистных сооружений промплощадки «А» введена в эксплуатацию линия обезвреживания твердых гальванических отходов. Количество ранее накопленных отходов составило 241 т, которые были обезврежены в полном объеме к концу 2012 г.



Площадка хранения гальваношламов выполнена в соответствии с санитарными требованиями и нормами, но потенциальная угроза загрязнения окружающей среды остаётся. Результаты собственного мониторинга позволяют выполнить анализ, сделать комплексную оценку состояния окружающей среды и оценку риска для здоровья населения в районе места накопления токсичных отходов.

На территории площадки гальваношламов организован мониторинг атмосферного воздуха и почв. В течение многолетних исследований с момента организации сбора гальваношламов в 1992 г. в пределах площадки сбора гальванических отходов загрязняющие вещества в атмосферном воздухе не зарегистрированы.

Анализ загрязнения почвы. С 2005 г. предприятие осуществляет контроль за состоянием почв, в том числе на территории, прилегающей к месту санкционированного сбора гальваношламов. Отбор проб осуществляется по графику, где указаны показатели и точки отбора проб [3]. График согласован с ТО ТУ Роспотребнадзора по г. Комсомольску-на-Амуре.

Загрязнения почв на площадке гальваношламов происходит в первую очередь в результате нарушения целостности контейнера под воздействием длительно хранящихся агрессивных гальванических шламов. При загрузке контейнера в цехе внешние стенки пачкаются отходами из ванн, а во время дождя служат дополнительным источником загрязнения тяжелыми металлами, кислотами и щелочами. Не исключены испарения загрязняющих веществ, в результате загрязняется атмосферный воздух, снег, а в конечном итоге почва.

При исследовании почвы важным этапом является отбор проб, который осуществлялся в соответствии с требованиями [4; 5]. Точечные пробы отбирались методом конверта по диагонали. Объединенную пробу готовили из точечных проб, которые отбирали послойно на глубине 0-5, 5-20 см массой до 0,2 кг [6]. Исследования проводила аттестованная лаборатория ОАО «КНААПО».

На рис. 1 – 5 представлены результаты лабораторных исследований в форме динамики среднегодовых концентраций (2006 – 2011 гг.) и их линейного тренда в сравнении со среднемноголетней концентрацией и ПДК (ОДК).

ПДК в почве для хрома, никеля, цинка, меди разработаны для подвижных форм металлов [7]. На кадмий в настоящее время разработаны ОДК для валового содержания металла, которые и использованы в работе.

Из данных, представленных на рис. 1 – 5, видно, что превышения ПДК в исследуемый период зарегистрированы только по шестивалентному хрому. Хромистые осадки имеют кислую среду, поэтому металлические контейнеры были особенно подвержены коррозии. Содержание хрома в контейнерах значительно превышает концентрации других металлов. ПДК подвижных форм шестивалентного хрома очень жесткие.

По остальным веществам в течение всего срока эксплуатации площадки гальваношламов превышение ПДК и ОДК не зарегистрировано.

Максимальное количество загрязняющих веществ поступило в почву в период в 2006 – 2008 гг. Длительно хранящиеся агрессивные отходы вызывали коррозию стенок и периодически попадали в окружающую среду. КНААПО своевременно принимало меры по недопущению загрязнения почв, поэтому содержание веществ в почве по большинству показателей в пределах ПДК и ОДК. С 2009 г. объединение приступило к переработке гальванических отходов, на обезвреживание отправлялись в первую очередь отходы в самых поврежденных контейнерах. Поступление загрязняющих веществ в почву в этот период сократилось, в том числе и по хрому. В 2011 г. превышения ПДК по шестивалентному хрому также не зарегистрированы. Это говорит об отсутствии поступления загрязняющего вещества в почву и о самоочищении среды. Аналогичная ситуация прослеживается по всем остальным веществам (меди, цинку, никелю, кадмию). Тренды показывают постепенное снижение содержания химических веществ по всем веществам.

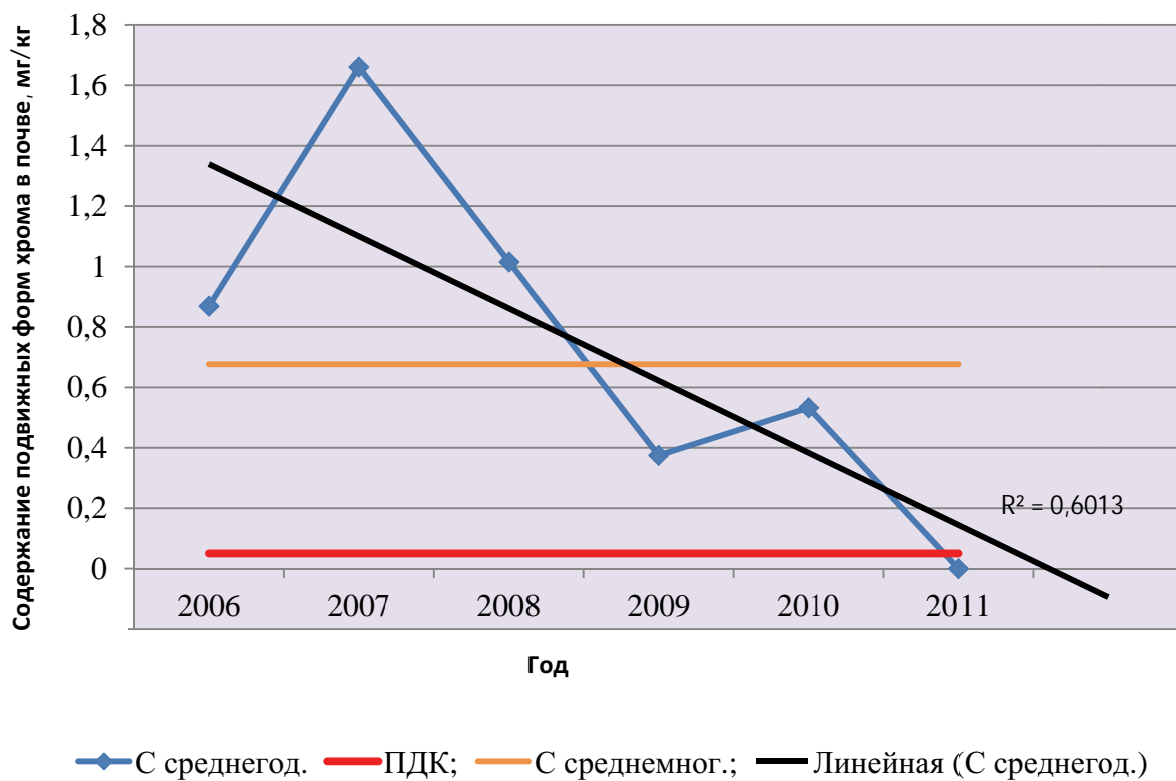


Рис. 1. Анализ содержания подвижных форм хрома в почве

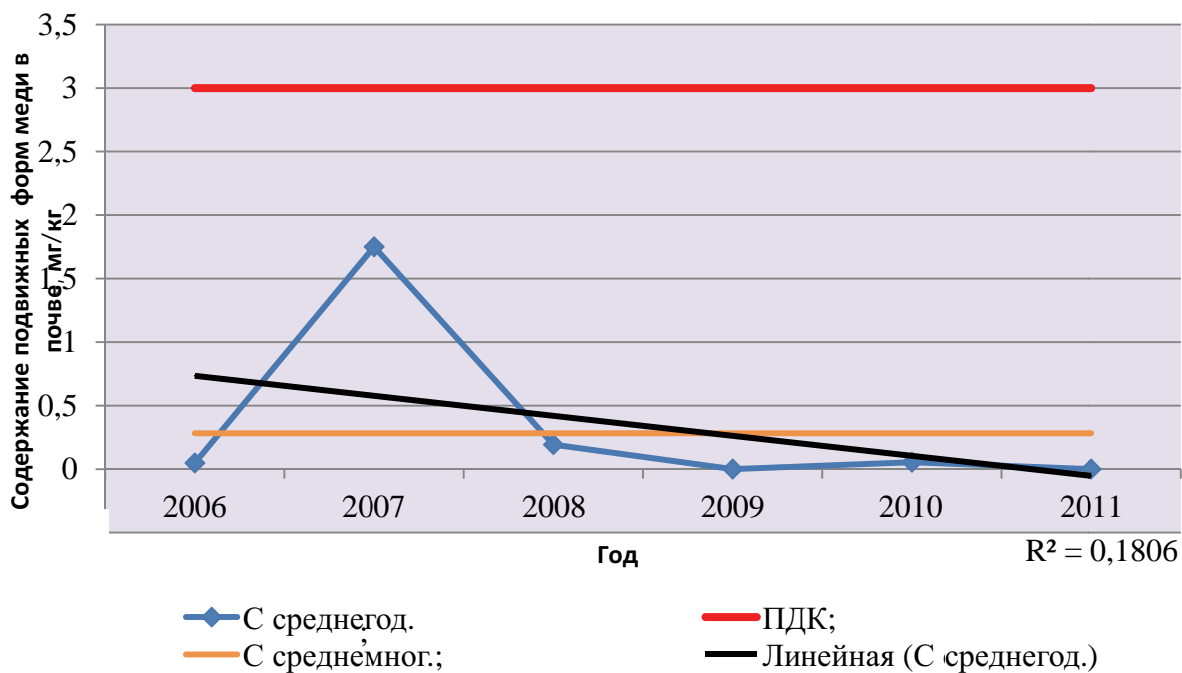


Рис. 2. Анализ содержания подвижных форм меди в почве

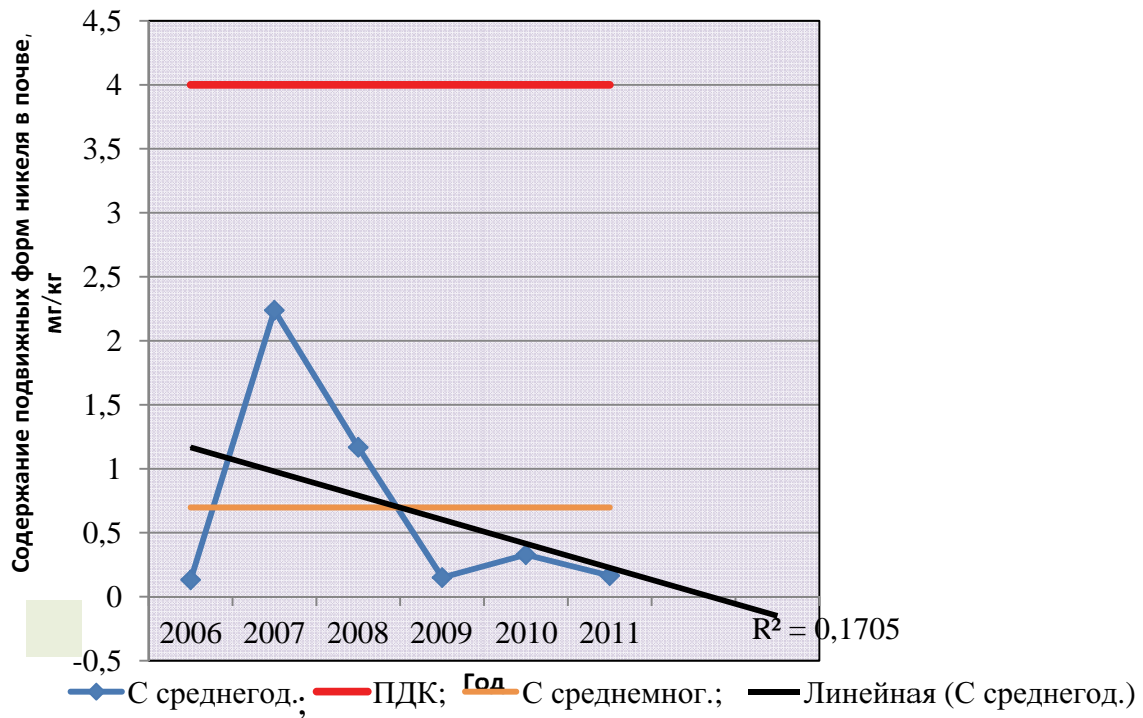


Рис. 3. Анализ содержания подвижных форм никеля в почве

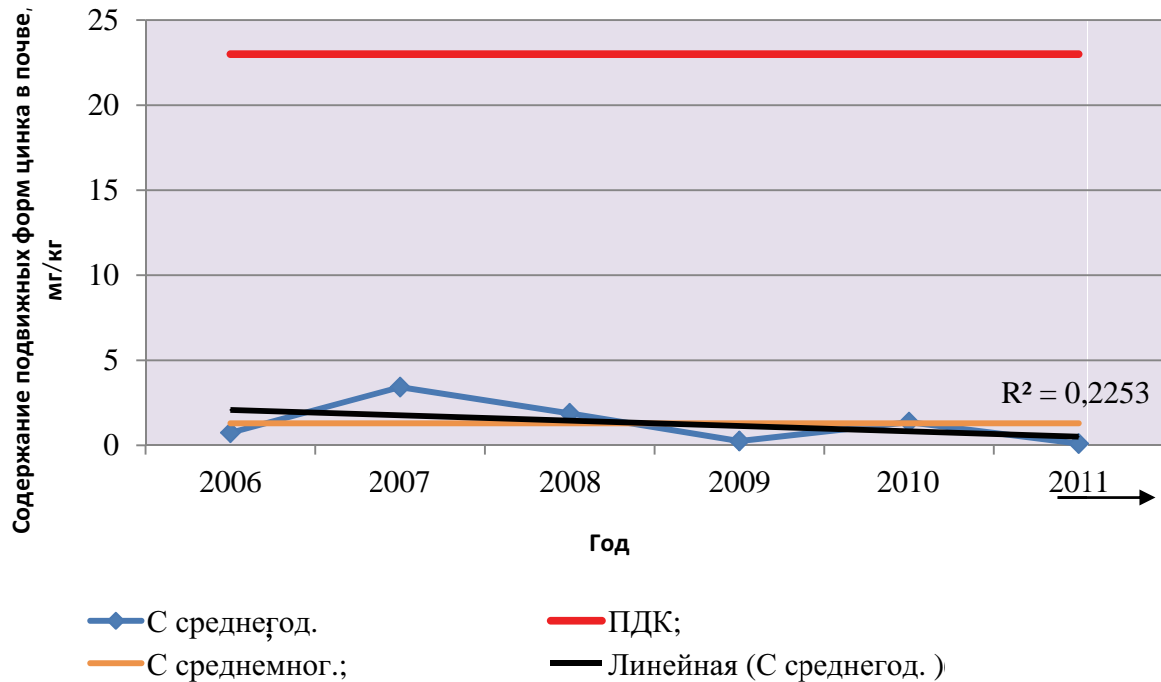


Рис. 4. Анализ содержания подвижных форм цинка в почве

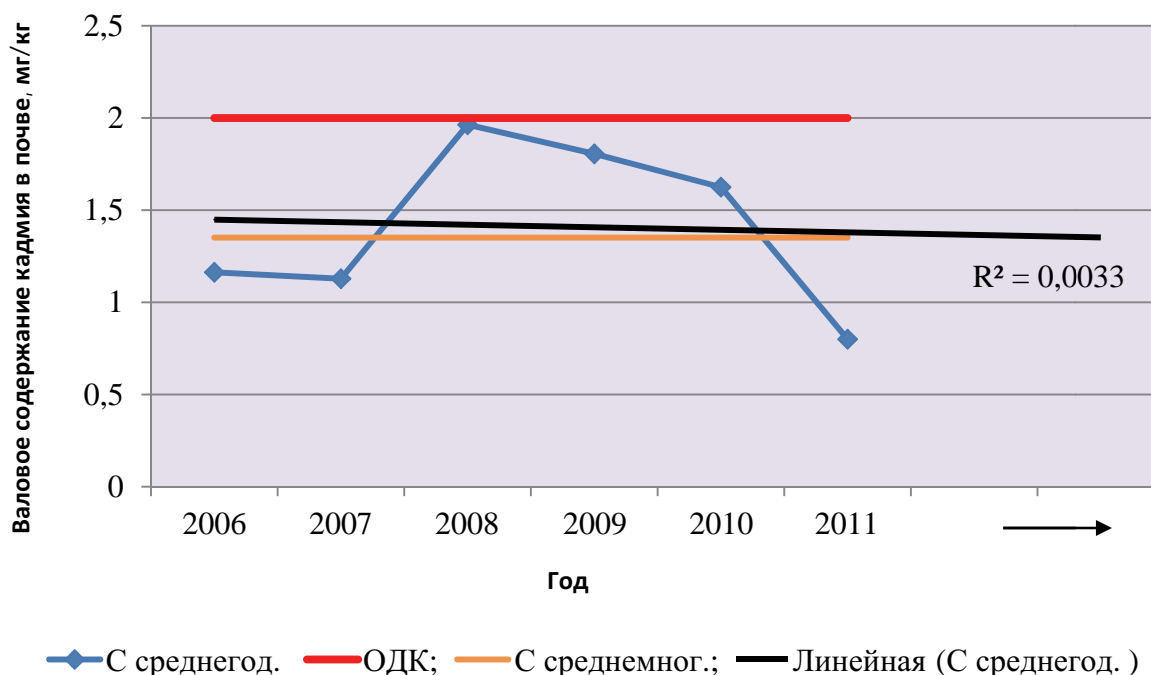


Рис. 5. Анализ валового содержания кадмия в почве

Оценка индивидуального канцерогенного риска для здоровья населения при пероральном, ингаляционном и кожном поступлении канцерогенов из почв при хранении гальваношламов выполнена в соответствии с [8].

К веществам с доказанной для человека канцерогенностью отнесены [9]: соединения шестивалентного хрома, соединения кадмия, соединения никеля.

Площадка для хранения гальваношламов расположена на территории объединения, но всего лишь в 50 м от жилого массива поселка Победы. Поэтому для расчета рисков был принят сценарий воздействия, характерный для постоянно проживающего населения.

Для расчета использованы стандартные формулы, разработанные специально для почв, и стандартные значения факторов экспозиции [8]. Результаты расчета индивидуального канцерогенного риска при пероральном, ингаляционном и кожном поступлении из почв при хранении гальваношламов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчет индивидуального канцерогенного риска при пероральном, ингаляционном и кожном поступлении тяжелых металлов из почв при хранении гальваношламов

Путь поступления	Индивидуальный канцерогенный риск			
	Хром (VI)	Кадмий	Никель	Суммарный по всем веществам
Пероральный	3,2546E-12	1,1675E-12	-	4,4221E-12
Ингаляционный	1,8493E-08	1,0998E-09	9,0409E-10	2,0497E-08
Накожный	6,9571E-08	2,4879E-08	-	9,4457E-08
Суммарный по всем путям	8,8067E-08	2,5980E-08	9,0409E-10	1,1495E-07

Обсуждение результатов. Как следует из представленных данных, суммарный канцерогенный риск соответствует пренебрежимо малому, не отличающемуся от обычных, повседневных рисков (ниже 10^{-6}) [8].

Выполненный расчет канцерогенных рисков несет в себе полезную информацию, т.к. подтверждает эффективность профилактических мер и эффективность внедрения линии обезвреживания гальваношламов.



Неопределенности. Такие малые риски объясняются с одной стороны тем, что в течение всего периода накопления гальванических отходов принимались серьезные меры по предотвращению попадания загрязняющих веществ в почву и в целом в окружающую среду.

С другой стороны, итоговая оценка риска не может быть абсолютно достоверной, т.к. оказывают влияние неопределенности, связанные с невозможностью учета ряда влияющих факторов.

Оценка выполнена на основе анализа загрязнения только территории предприятия. В почве под воздействием различных факторов может происходить постоянная миграция попадающих в неё веществ и перенос их на большое расстояние. Загрязняющие почву вещества могут переходить в воду, в растения, в организм животных. Эти вещества перемещаются с грунтовыми и дождевыми водами при таянии снега. Нельзя также исключить перенос водой и ветром на большие расстояния опавших листьев, содержащих тяжелые металлы и другие токсичные вещества. Вредные вещества могут переноситься на большие расстояния с пылью от загрязненной почвы.

Степень загрязнения почв зависит от мощности, характеристики, продолжительности работы источника загрязнения, а с другой стороны, от ландшафтно-геоморфологических условий (от сорбционной способности почвы, движения воды в горизонте, значения рН).

Максимальное содержание металлов в почвах наблюдается на расстояниях 1-5 км от источников загрязнения. Они могут превышать фоновые уровни на 1-2 порядка. По мере удаления от источника загрязнения содержание металлов уменьшается и на расстоянии 15-20 км приближается к фоновому уровню. Глубина проникновения тяжелых металлов в загрязненных почвах обычно не превышает 20 см, при сильном загрязнении проникают на глубину до 160 см. Опасность такого залегания состоит в том, что при кислой реакции среды имеется угроза поступления токсичных металлов в виде водорастворимых форм в грунтовые воды.

Все эти широко известные из литературных источников [10] данные свидетельствуют о необходимости проведения дополнительных исследований непосредственно на жилых территориях, и, особенно, в зонах размещения детских учреждений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гореликова, Е. И. Оценка ингаляционного канцерогенного риска здоровью населения г. Комсомольска-на-Амуре от свинцового загрязнения / Е. И. Гореликова, М. В. Гаврилова, И. П. Степанова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 93-102.
2. Алгоритм оценки опасности выбросов предприятия за «цикл жизни» и после закрытия / И. П. Степанова, Е. И. Гореликова, А. Н. Степанов, Ю. Г. Лещев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – № IV-1(12). – 2012. – С. 91-106.
3. ГОСТ 17.4.3.03-85. Почвы. Общие требования к методам определения загрязняющих веществ. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1985.
4. ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1993.
5. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1993.
6. ГОСТ Р 53091-2008. Качество почвы. Отбор проб. Ч. 3. Руководство по безопасности. – М.: Стандартинформ, 2009.
7. ГН 2.1.7.2041- 06.2.1.7. Почва, очистка населенных мест, отходы производства и потребления, санитарная охрана почвы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы, утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 19 января 2006 г.
8. Р 2.1.10.1920 – 04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду, утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 5 марта 2004 г.
9. Н 1.1.725-98. Перечень веществ, продуктов, производственных процессов, бытовых и производственных факторов, канцерогенных для человека (утв. Гл. гос. сан. врачом РФ от 23 декабря 1998 г.).
10. Дмитриев, М. Т. Санитарно-химический анализ загрязняющих веществ окружающей среде: справ. изд. / М. Т. Дмитриев, Н. И. Казнина, И. А. Пинигина. – М.: Химия, 1989. – 368 с.

ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ CHRONICLE OF SCIENTIFIC LIFE

Мешков А. С., Максимов В. К.
A. S. Meshkov, V. K. Maksimov

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЦЕНТРА РОБОТОТЕХНИКИ КНАГТУ

THE CENTRE FOR ROBOTIC TECHNOLOGY, KOMSOMOLSK-ON-AMUR STATE TECHNICAL UNIVERSITY



Мешков Александр Сергеевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», руководитель Центра робототехники Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 8(909)898-15-77. E-mail: meshkov@live.ru

Mr. Alexander S. Meshkov – PhD in Engineering, Senior Lecturer, Department of Electro drive Engineering and Industrial Automation, head of the Centre for Robot Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur; phone: + 7 909 8981577. E-mail: meshkov@live.ru



Максимов Владислав Константинович – студент группы 2ИПб-1 Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vlad_mail94@mail.ru

Mr. Vladislav K. Maksimov – Bachelor student of Software Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur. E-mail: vlad_mail94@mail.ru

Аннотация. В статье представлен краткий обзор основных направлений деятельности Центра робототехники КнАГТУ.

Summary. The article provides a brief overview of the main activities of the Centre of Robotics KnASTU.

Ключевые слова: робот, робототехника, КнАГТУ, Технопарк, программирование, образование.

Key words: Robot, Robotics, KnASTU, Technology Park, programming, education.

УДК 004.896

Центр робототехники, организованный как структурное подразделение Технопарка ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», начал свою работу в конце 2012 г. В полную мощность Центр робототехники начал функционировать с начала 2013 г, когда в Технопарке было предоставлено помещение, оснащенное всем необходимым оборудованием. Центр робототехники осуществляет свою деятельность совместно с сетью СКБ КнАГТУ и служит площадкой для научно-исследовательского творчества молодежи города.

Работа Центра в настоящее время направлена в первую очередь на студентов КнАГТУ и учащихся школ г. Комсомольска-на-Амуре. Для каждого из этих двух направлений работы применяется соответствующее оборудование.

Так, для занятий школьной робототехникой приобретены робототехнические наборы Lego Mindstorm NXT 2.0, Tetrrix, Robobuilder, а также дополняющие их ресурсные наборы. На данный момент имеющегося оборудования хватает для проведения занятий по робототехнике в группе из 10 чел. Как правило, программирование таких роботов осуществляется в среде LabView, что является вполне приемлемым для уровня знаний школьников. И все возможно-



сти этой среды программирования учащиеся используют по максимуму, создавая многофункциональных роботов, удовлетворяющих одновременно множеству критериев. Занятия робототехникой дают школьникам не только основы программирования, результаты которого они могут сразу же наглядно увидеть и продемонстрировать другим, но и позволяют на практике применить знания физики и математики. Также, что немаловажно, учащиеся учатся работать в команде, что особенно требуется при проведении командных турниров по робототехнике.

Занятия проводятся под руководством преподавателя, совместно с которым ребята решают многие задачи. Некоторые задачи им ставит преподаватель, а некоторые – они придумывают сами. В последнем случае очень большое значение принимает знание теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) в качестве инструмента поиска эффективного решения поставленной задачи или проблемы.

По этой причине со следующего учебного года планируется запустить факультативные курсы на базе Технопарка КнАГТУ, на которых школьники города будут изучать информатику, математику, физику, ТРИЗ и робототехнику. Только такое всестороннее и комплексное образование позволит сформировать инженерный склад мышления у будущих студентов.

Для работы со студентами применяется более сложное и функциональное оборудование, направленное не только на инженерную, но и на научно-исследовательскую работу. Студент должен овладеть на практике умением программировать микроконтроллеры, получить знания электронной техники, 3D моделирования и деталей машин. Немаловажным является тот факт, что в процессе работы студенты активно работают с англоязычными информационными ресурсами, что позволяет им повысить словарный запас технического английского языка, а также мотивировать их на более глубокое изучение английского языка.

На данный момент Центр робототехники располагает широким парком мобильных роботов, таких, как: роботизированные платформы, роботы-сумо, роботы-футболисты, гексаподы, а также различные датчики и микроконтроллеры. Для программирования применяются такие языки программирования, как C++, Assembler, Basic.

Работа в направлении студенческой робототехники ориентирована на освоение уже существующего уровня развития робототехники в мире, а также на проведение научно-исследовательских работ в данном направлении. Научно-исследовательская деятельность в Центре робототехники реализуется по следующим направлениям в сотрудничестве с кафедрами университета [1]:

- разработка позиционных роботизированных платформ;
- обеспечение связи между роботами для координации их работы;
- разработка алгоритмов передвижения робототехнических комплексов по заданным геометрическим координатам с учетом рельефа местности;
- разработка системы технического зрения, включающая в себя систему распознавания образов с организацией базы данных на основе анализа распознавания.

Силами Центра робототехники проводятся соревнования по робототехнике среди учащихся школ и студентов КнАГТУ. Проведенные внутренние соревнования среди школьников позволили не только выявить сильнейших, но и заинтересовать новых учащихся к занятиям робототехникой.

Центр робототехники в своей работе, как структурное подразделение Технопарка, тесно связан с сетью СКБ. Благодаря этому у сотрудников Центра есть доступ к современному технологическому оборудованию Технопарка, что позволяет в короткие сроки создать собственные необходимые элементы для робота, например печатные платы.

С января 2013 г. Центр робототехники КнАГТУ участвует в программе «Робототехника» Федерального агентства по делам молодежи, что позволит университету принимать участие в соревнованиях по робототехнике в России, а также участвовать в образовательных программах, проводимых агентством.

Также со следующего учебного года элементы студенческой робототехники планируются внедрить в учебный процесс в качестве лабораторных работ по программированию микроконтроллеров, что позволит студентам в рамках учебного процесса ознакомиться с основами создания микропроцессорных систем управления роботизированными комплексами.

Все вышесказанное позволяет заключить, что деятельность Центра робототехники носит комплексный характер, направленный на поиск творчески активных ребят, начиная со школы, предоставляя им возможность на практике освоить основные положения математики, физики и информатики. Затем, будучи студентом, активно развивать инженерные навыки, создавая свои робототехнические системы и, наконец, проводить научные исследования в рамках обучения в магистратуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин, В. М. Математическая модель автономного источника с электромашинным формированием кривой выходного напряжения / В. М. Кузьмин, В. И. Суздорф // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 23-28.