

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

Гусева Р. И., Феоктистов С. И.
R. I. Guseva, S. I. Feoktistov

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМОВАНИЯ ТРЁХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ
ДЛЯ ХВОСТОВЫХ ОТСЕКОВ РУЛЕЙ НАПРАВЛЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ
САМОЛЁТОВ**

**FEATURES OF FORMING THREE-LAYERED PANELS WITH THE FILLER
FOR THE TAIL SECTIONS OF RUDDERS OF PASSENGER AIRCRAFT**

Гусева Роза Ивановна – кандидат технических наук, профессор кафедры технологии самолётостроения, заместитель декана самолётостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: r_guseva@knastu.ru.

Ms. Roza I. Guseva – PhD in Engineering, professor, Department of airplane technology, deputy dean of aircraft building faculty, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: r_guseva@knastu.ru.

Феоктистов Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, декан самолётостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: + 7 (914) 175-43-42. E-mail: ssf@knastu.ru.

Mr. Sergey I. Feoktistov – Doctor of Engineering, Professor, Dean of the faculty of aircraft, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ssf@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены особенности формования элементов хвостовых отсеков рулей направления для пассажирских самолётов. Хвостовой отсек руля направления (ХОРН) современного пассажирского самолёта представляет собой интегральную композитную трёхслойную сотовую конструкцию, состоящую из двух композитных слоистых обшивок (верхней и нижней), композитных силовых двухстеночных и нормальных одностеночных нервюр. Рассмотрены технологии изготовления композитных обшивок и нервюр с вкладышами, представлена общая технология формования композитного изделия. Приведены блок-схемы технологического процесса изготовления каждого элемента и самого изделия. Приведены рисунки внешнего вида изделия, обшивок и нервюр. Уделено внимание тщательному контролю промежуточных процессов изготовления элементов изделия и окончательному контролю изделия. Рассмотрены особенности внешнего контроля препрегов, операций укладки слоёв препрега в формы и на болванки (встык, внахлест). Формование изделия идёт вакуумно-автоклавным методом, который обеспечивает изделию лучшее качество.

Summary. The features of forming the elements of the tail sections of the rudders for passenger aircraft are considered. The tail section of the rudder (HORN) of a modern passenger aircraft is an integral composite three-layer honeycomb structure consisting of two composite layered covers (upper and lower), composite power two-walled and normal single-walled ribs. The technologies of manufacturing composite plating and ribs with inlay-breaths are considered, the general technology of forming a composite product is presented. The block diagrams of the technological process of manufacturing each element and the product are given. The drawings of the appearance of the product, plating and ribs are given. Attention has been paid to careful monitoring of intermediate manufacturing processes for the elements of the product and final control of the product. The features of the external control of prepregs, the operations of laying the prepreg layers in molds and on the blanks (butt-end, v-bludge) are considered. Molding of the product is carried out by a vacuum-autoclave method, which gives the best quality to the product.

Ключевые слова: автоклавное формование, композиционные материалы, панели, нервюры, обшивка, укладка, технологический процесс.

Key words: autoclave molding, composite materials, panels, ribs, skinning, laying, technological process.

УДК 629.735

Самолётостроение – специальная область промышленности, в которой одним из главных условий является получение конструкции минимальной массы при высокой прочности. Добиться облегчения изделия возможно лишь путём применения полимерных композиционных материалов (ПКМ): стеклопластиков, углепластиков и органопластиков.

Использование вышеперечисленных материалов позволяет увеличить ресурс конструкции за счёт особых свойств ПКМ (повышенная жёсткость, стойкость к вибронагрузкам, устойчивость к разного рода химическим воздействиям, влагостойкость, теплостойкость и огнеупорность, возможность сокращения числа конструктивных элементов).

Хвостовой отсек руля направления – изделие, работающее в зоне высоких и низких температур и не подвергающееся значительной деформации. Представляет собой интегральную композитную конструкцию, состоящую из двух трёхслойных панелей с сотовым наполнителем, силовых и нормальных нервюр. Расположение элементов показано на рис. 1.

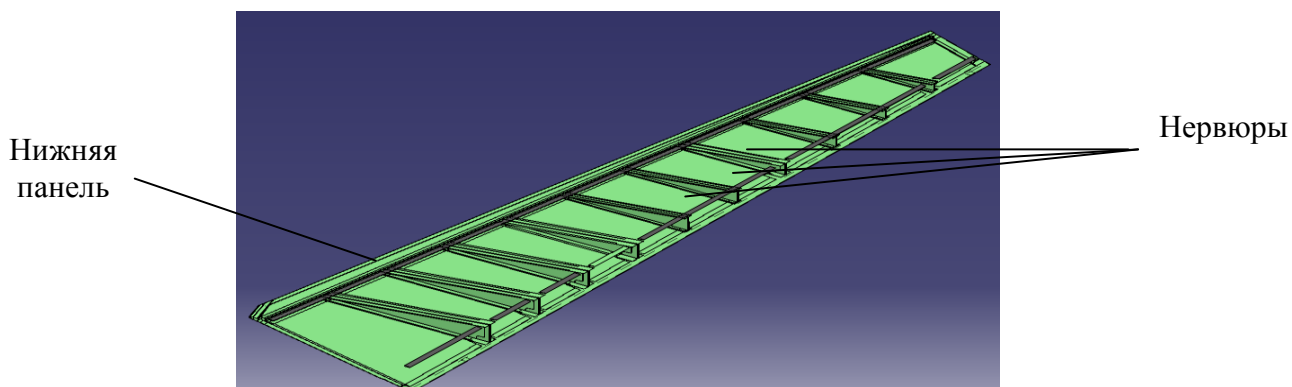


Рис. 1. Интегральная конструкция хвостового отсека руля направления (верхняя панель и законцовка не показаны)

Конструкция состоит из следующих материалов:

- при изготовлении верхней и нижней обшивок панели с сотовым наполнителем использованы клеевые угольные препреги КМКУ-2м.120.Э01.45, КМКУ-2м.120.Э01.65; стеклопрепреги КМКС-2м.120.Т10.37, КМКС-2м.120.Т10.55; сотовый наполнитель ПСП-1-2,5-64 и молниезащитное полотно марки ПМ-0,08;

- при изготовлении одностенных и двустенных нервюр использованы стеклопрепреги КМКС-2м.120.Т10.37, КМКС-2м.120.Т10.55 и полимерсотопласт ПСП-1-2,5-64 (для сотовых вкладышей по стенкам нервюр).

Одностенные нормальные рядовые нервюры состоят из стенок (слои препрега) и вкладыша (см. рис. 2).

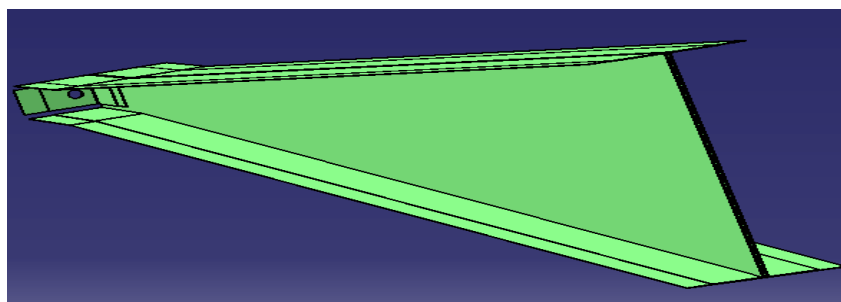


Рис. 2. Внешний вид отформованной одностенной нервюры

Изготовление верхней и нижней обшивок трёхслойных панелей с сотовым наполнителем ведётся с учётом расчётной схемы укладки слоёв препрега, что и показано на рис. 3.

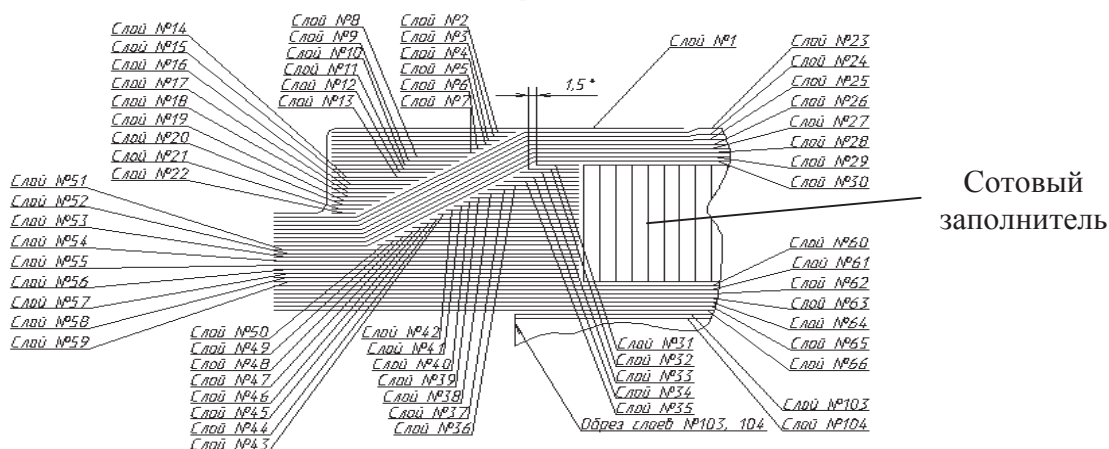


Рис. 3. Схема укладки слоёв препрега для панели

Каждый из перечисленных элементов конструкции ХОРН изготавливается самостоятельно с применением режима предварительного формования (подформовка), затем собирается в единое целое и формируется по режиму окончательного отверждения вакуум-автоклавным формованием. Вакуум-автоклавный метод формования применяется в серийном производстве для качественного изготовления силовых конструкций.

1. Процесс изготовления трёхслойных панелей, состоящих из верхней и нижней обшивок с сотовым наполнителем, включает в себя выполнение следующих операций:

- подготовить оснастку к выкладке слоёв препрегов (обработать поверхности оснастки антиадгезионным составом по спецтехнологии);
- раскроить стекло- и углепрепреги КМКС и КМКУ на заготовки (раскрой препрега производится без снятия разделительной полиэтиленовой плёнки), причём слои верхней обшивки, контактирующие с молниезащитным полотном и сотовым наполнителем, выполнять из углепрепрега КМКУ с учётом технологического припуска 20...30 мм;
- провести укладку на оснастку молниезащитного полотна согласно чертежу;
- выложить согласно чертежу слои верхней обшивки;
- снять разделительную плёнку с раскроенного слоя препрега и выложить на подготовленную оснастку, соблюдая параллельность направления основы наполнителя углу выкладки в соответствии с линиями разметки, нанесёнными на оснастку. Схему выкладки производить согласно конструкторской документации (КД);
- заготовки из препрегов на основе однонаправленных углеродистых лент вдоль основы выкладывать встык: допускаются местные зазоры шириной не более 1мм. Появление поперечных стыков углеродистых лент не допускается. Разровнять заготовку, исключая образование складок и воздушных пузырей; прикатать выложенный слой через полиэтиленовую или фторопластовую плёнку прикаточным роликом (при необходимости нагретым до температуры не более 60 °С);
- каждый выложенный слой препрега предъявить контролёру ОТК для проверки на соответствие чертежу схемы укладки слоёв, отсутствие складок, воздушных пузырей, инородных включений, разделительной плёнки; контроля ориентации угла укладки.
- уложить в соответствии с чертежом подготовленный сотовый наполнитель из полимеросотопласта ПСП-1-2,5-64. Склейку сотового наполнителя производить вспенивающимся плёночным клеем ВКВ-3 в соответствии с инструкцией. Допускается склейку сотового наполнителя производить одновременно с формованием панели;
- раскроить углепрепреги на заготовки и выложить согласно чертежу слои усиления обшивок;

- выложить сверху на панель жертвенный слой (ткань фильтровальная). Применение жертвенного слоя обязательно на поверхностях, по которым в дальнейшем производится склеивание;
- одновременно с панелью изготовить образцы-свидетели для определения прочности при отрыве клеевого соединения сотового заполнителя с обшивкой по стандарту. Габариты панели, высота сотового заполнителя, схема выкладки и количество слоёв в обшивках панели для вырезки образцов-свидетелей должны быть указаны в КД. Панель для вырезки образцов-свидетелей формировать в одном вакуумном мешке с панелью или на отдельной оснастке в отдельном вакуумном мешке, последовательно соединённом с вакуумным мешком формуемой трёхслойной панели;
- собрать *технологический пакет*;
- накрыть заготовку антиадгезионной (разделительной) плёнкой фторопластовой;
- установить цулагу (материал цулаги – стеклотекстолит КАСТ-В или стальные и алюминиевые контуры);
- на полученный слоёный пакет выложить два-три дренажных слоя из стеклоткани, прикатать так, чтобы устранить складки. На острые кромки пакета выложить дополнительные дренажные слои. Вместо стеклоткани разрешается применять нетканый материал Ultraweave 1032 фирмы AIRTECH (использование до значения температуры, равного 232 °С; поверхностная плотность 340 г/м²) либо ткань Т-10-80 или Т-10-14;
- вырезать плёнку для вакуумного мешка. Для обеспечения свободного облегания вакуумным мешком формуемого изделия плёнку кроить большего размера, величина припуска от 150 мм до 300 мм на 1 м длины и ширины полотна. Для изделий сложной конфигурации при большой высоте изделия припуск на складки может составлять более 300 мм. Используется плёнка полиамидная неориентированная марки ТС и плёнка полиамидная Iprlon KM 1300 (фирма-изготовитель AIRTECH);
- накрыть собранный пакет вырезанной плёнкой;
- для контроля за температурным режимом формования установить не менее двух термодатчиков (диапазон измерения 0...300 °С) при площади детали менее 10 м². Установить термодатчики под вакуумным мешком на панель в области технологического припуска и на оснастке. Термодатчики, установленные на оснастке, накрыть имитатором технологического пакета размером не менее 80x80 мм. Точкой начала режима на диаграмме процесса формования будет точка начала нагрева;
- установить на вакуумный мешок штуцеры из расчёта один штуцер на 1,5 м...2,0 м длины детали. Установить штуцер для подсоединения контрольного вакуумметра (вакуумметр самопишущий ВТС-712М1, предел измерения -1...0 кг/см², класс точности 1) на расстоянии не менее 300 мм от вакуумных трубок или штуцеров (внутренний диаметр 8...12 мм), подключённых к вакуумной системе. Положить под отверстия штуцеров латунную сетку размером 50x50 мм, закрепить её при помощи ленты полиэтиленовой с липким слоем;
- обезжирить оснастку в зоне установки уплотнительного жгута-герметика (АТ 200У AIRTECH или уплотнительный жгут 51-Г-27) бензином-растворителем с антистатической присадкой «Сигбол» или ацетоном техническим;
- положить по периметру оснастки уплотнительный жгут на расстоянии 20...30 мм от края технологического пакета;
- снять с уплотнительного жгута ламинированную бумагу и прикатать прикаточным роликом плёнку к жгуту. Для предотвращения натяжения или зависания вакуумного мешка в местах большой кривизны детали и разрыва плёнки при вакуумировании пакета при установке вакуумного мешка необходимо закладывать складки высотой до 100 мм;
- произвести контроль герметичности вакуумного мешка: подключить форму к вакуумной системе; создать разрежение под мешком не менее 0,08 МПа (0,8 кг/см²); выдержать 10 мин, затем перекрыть вентиль, соединяющий вакуумный мешок с вакуумным насосом (ВН-12М); проконтролировать изменение давления в вакуумном мешке. Вакуумный мешок считается герметичным, если изменение давления под мешком на 0,01 МПа (0,1 кг/см²) происходит более, чем за 1 мин;
- транспортировать оснастку с собранным пакетом в автоклав (автоклав электрический типа «Шольц», давление формования не менее 0,7 МПа с допускаемой погрешностью измерения



$\pm 0,025$ МПа, значение температуры нагрева составляет не менее 220 °С с допускаемой погрешностью измерения ± 5 °С);

- произвести контроль герметичности автоклава: соединить с помощью переходников шланги вакуумной линии и контрольной линии; включить вакуумный насос (ВН-12М), создать разрежение не менее $0,08$ МПа ($0,8$ кгс/см²); перекрыть поочередно вентили, соединяющие вакуумную систему с вакуумным насосом; проконтролировать снижение вакуума. Допускается изменение давления на любой линии не более, чем на $0,01$ МПа ($0,1$ кгс/см²) за промежуток времени, равный не менее 10 мин;

- произвести контроль герметичности вакуумного мешка: установить форму с панелью в автоклавную тележку; подключить форму к вакуумной системе автоклава; создать разрежение под мешком не менее $0,08$ МПа ($0,8$ кгс/см²); выдержать 10 мин, затем перекрыть вентиль, соединяющий вакуумный мешок с вакуумным насосом; проконтролировать изменение давления в вакуумном мешке. Допускается снижение давления в мешке не более, чем на $0,01$ МПа ($0,1$ кгс/см²) за промежуток времени, равный не менее 1 мин. Вакуумный мешок считается герметичным, если изменение давления под мешком на $0,01$ МПа ($0,1$ кгс/см²) происходит более чем за 1 мин. В случае негерметичности вакуумного мешка следует проверить укладку уплотнительного жгута и прилегание к нему плёнки;

- произвести автоклавное формование по режиму: создать разрежение под вакуумным мешком не менее $0,08$ МПа ($0,8$ кгс/см²); повысить температуру до (125 ± 5) °С со скоростью не более 2 °С/мин; выдержать при температуре (125 ± 5) °С в течение $(60+5)$ мин; повысить давление до $0,20+0,025$ МПа ($2,0+0,25$ кгс/см²); при достижении давления $0,1$ МПа (1 кгс/см²) отключить вакуумный насос, соединить вакуумный мешок с атмосферой; повысить температуру до $175+5$ °С со скоростью не более 2 °С/мин; выдержать при температуре $175+5$ °С и давлении $0,20+0,025$ МПа ($2,0+0,25$) кгс/см² в течение $180+5$ мин; охладить под давлением $0,20+0,025$ МПа ($2,0+0,25$) кгс/см² до температуры не более 40 °С со скоростью не более 1 °С/мин; сбросить давление; вынуть оснастку с готовым изделием из автоклава; провести выемку изделия из оснастки осторожно, не повреждая поверхностных слоёв; провести контроль качества изготовленной панели импедансным акустическим методом. Если в препрегах используется эпоксифенольное связующее, то для качественного отверждения связующего в препрегах давление необходимо поднять до $0,6$ МПа.

2. Одностенные нервюры состоят из монолитного вкладыша, на который укладываются слоистые стенки стеклопрега с обеих сторон. **Процесс изготовления одностенных нервюр** включает в себя несколько этапов:

2.1. Технология изготовления монолитного вкладыша отдельной деталью

Технологические операции:

а) раскроить слои стеклопрепрега и подготовить оснастку;
б) выложить на рабочую часть оснастки согласно чертежу общую заготовку (выкладку слоёв заготовок производить обязательно с применением жертвенного слоя (ткань фильтровальная);
в) провести подготовку к автоклавному формованию, затем провести автоклавное формование по следующему режиму:

- создать разрежение под вакуумным мешком не менее $0,08$ МПа ($0,8$ кгс/см²);
- повысить температуру до 125 ± 5 °С со скоростью не более 2 °С/мин;
- выдержать при температуре до (125 ± 5) °С в течение $(60+5)$ мин;
- повысить давление до $0,5+0,05$ МПа ($5+0,5$) кгс/см²);
- отключить вакуумный насос, соединить вакуумный мешок с атмосферой;
- повысить температуру до 180 ± 5 °С со скоростью не более 2 °С/мин;
- выдержать при температуре 180 ± 5 °С и давлении $0,5+0,05$ МПа ($5+0,5$) кгс/см²) в течение $(180+5)$ мин;

- охладить под давлением $0,5+0,05$ МПа ($5,0+0,5$) кгс/см²) до температуры не более 40 °С со скоростью не более 1 °С/мин;

- сбросить давление; вынуть оснастку с общей заготовкой из автоклава; провести выемку заготовки из оснастки осторожно, не повреждая поверхностных слоёв;

г) разметить согласно чертежу на заготовке вкладыш для одностенной нервюры и вырезать согласно разметке вкладыш;

д) произвести визуальный контроль вкладыша, не снимая жертвенного слоя.

2.2. Выкладка и подформовка одностенных нервюр

Технологические операции:

- на подготовленную оправку (оснастку) уложить разделительную перфорированную плёнку (фторопластовая перфорированная);

- раскроить слои стеклопрепрега на заготовки стенок нервюр и выложить согласно чертежу стенки нервюр (слои, контактирующие с вкладышем по стенке нервюр, выкладывать из препрега КМКС-2м.120.Т10.55);

- установить изготовленный заранее вкладыш на слои препрега на первой оправке, выложить вкладыш, на вкладыш выложить вторую оправку с заранее выложенными слоями препрега согласно рис. 4;

- нарезать из препрега КМКС-2м.120.Т10.37 заготовки шириной 3...5 мм, выложить в радиусные зоны (места перехода стенка-полка);

- уложить разделительную плёнку; установить цулаги из стеклотекстолита КАСТ-В на всю ширину полок нервюры;

- уложить дренажные слои, установить вакуумный мешок. Произвести **вакуумную подформовку** при температуре +18...+25 °С и разрежении под мешком не менее 0,07 МПа (0,7 кг/см² в течение 1,0...1,5 ч);

- разобрать вакуумный мешок, снять цулаги, произвести визуальный контроль качества заполнения радиусов. При необходимости положить дополнительно стеклопрепрег в радиусных местах.

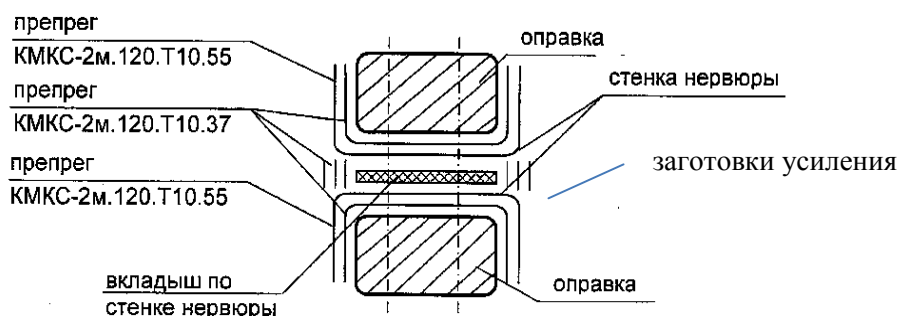


Рис. 4. Схема расположения элементов и оправок в одностенной нервюре

3. Технология изготовления двустенных нервюр

Двустенные нервюры (пять штук) состоят из пояса, трёхслойных сотовых вкладышей и стенок нервюр (см. рис. 5). Все детали изготавливаются самостоятельно, затем собираются в единую конструкцию.

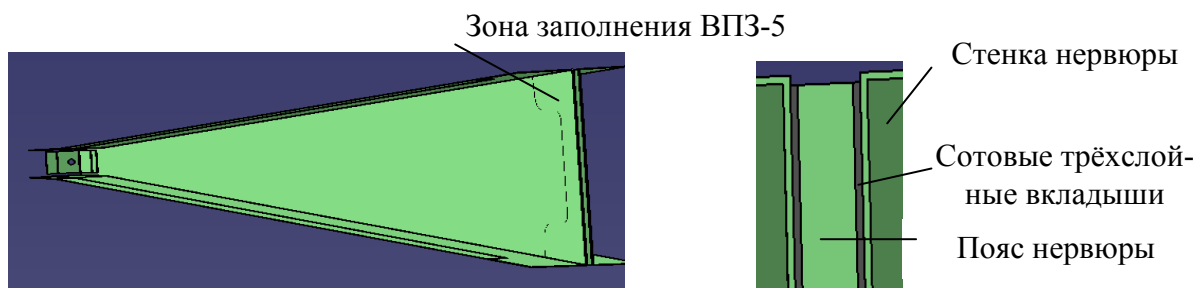


Рис. 5. Структурная схема двустенной нервюры

Трёхслойный сотовый вкладыш изготавливается следующим образом:

- раскроить сотовый наполнитель из полимерсотопласта ПСП-1-2,5, обработать в окончательные размеры;
- заполнить сотовый наполнитель полимерным наполнителем ВПЗ-5 в зоне усиления;
- раскроить слои стеклопрепрега для стенок, произвести выкладку слоёв и сотового полимерсотопласта на оправки с применением жертвенного слоя и вспомогательных материалов;
- провести подготовку к автоклавному формованию согласно ранее изложенному; провести автоклавное формование по предварительному режиму, изложенному ранее (давление не более $0,20+0,025$ МПа при температуре 125 ± 5 °С в течение $60+5$ мин);

Выкладку и подформовку пояса нервюры на оправку производить следующим образом:

- на подготовленную оправку по верхней и нижней полкам установить накладки из стеклотекстолита КАСТ-В толщиной 1 мм, зафиксировать липкой лентой, обернуть одним слоем разделительной плёнки. Раскроить слои препрега (слои, контактирующие с вкладышем по стенке нервюры, выкладывать из более силового стеклопрепрега) и выложить заготовки пояса нервюры (см. рис. 6), проложив по полкам между заготовками разделительную плёнку. На собранный пакет уложить разделительную плёнку;
- уложить дренажные слои, установить вакуумный мешок; произвести вакуумную подформовку при температуре $+18...+25$ °С и разрежении под мешком не менее 0,07 МПа ($0,7$ кг/см²) в течение 1,0...1,5 ч;
- разобрать вакуумный мешок, аккуратно снять с оправки подформованные заготовки пояса нервюры, снять накладки из стеклотекстолита.

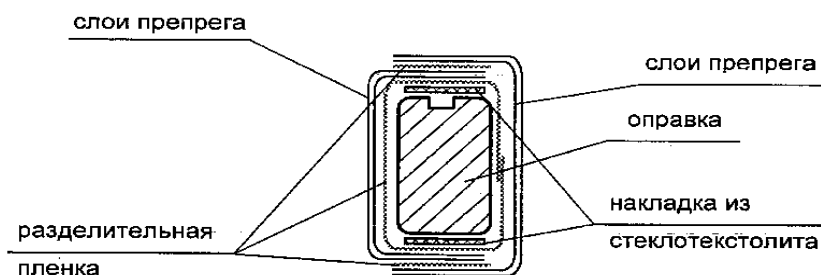


Рис. 6. Схема выкладки заготовок пояса двустенных нервюр для подформовки

Выкладку стенок нервюры, сборку и подформовку производить по операциям:

- на оправки выложить согласно чертежу заготовки правой и левой стенок нервюр (см. рис. 7), установить заранее изготовленный трёхслойный сотовый вкладыш по стенкам нервюр, базируясь по отверстиям на припуске со стороны лонжерона;
- на внутреннюю оправку установить вакуумный мешок (для изготовления вакуумного мешка применять плёнку полиамидную неориентированную марки ТС), обернуть одним слоем дренажа (ткань Т-10-80, Т-10-14) и одним слоем разделительной плёнки (плёнка фторопластовая). Установить заранее изготовленные заготовки пояса нервюры;
- собрать три оправки с установленными заготовками из препрега, закрепить болтами;
- раскроить и выложить в соответствии с чертежом по полкам нервюр по два слоя препрега КМКС-2м.120.Т10.37 (см. рис. 8);
- в местах перехода стенок и полок проложить полосы препрега. Нарезать из препрега заготовки шириной 3...5 мм, выложить в радиусные зоны (места перехода стенка-полка);
- уложить разделительную плёнку. Установить цулаги из стеклотекстолита (стеклотекстолит КАСТ-В) на всю ширину полок нервюр сверху и снизу;
- уложить дренажные слои, установить вакуумный мешок. Произвести вакуумную подформовку при температуре $+18...+25$ °С и разрежении под мешком не менее 0,07 МПа ($0,7$ кг/см²) в течение 1,0...1,5 ч;

- разобрать вакуумный мешок, произвести визуальный контроль качества заполнения радиусов. При необходимости положить дополнительно препрег КМКС-2м.120.Т10.37 в радиусных местах.

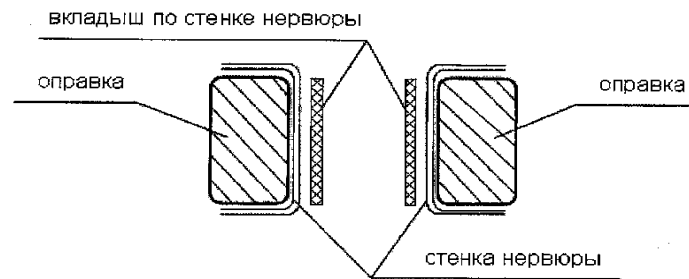


Рис. 7. Схема выкладки стенок двустенных нервюр

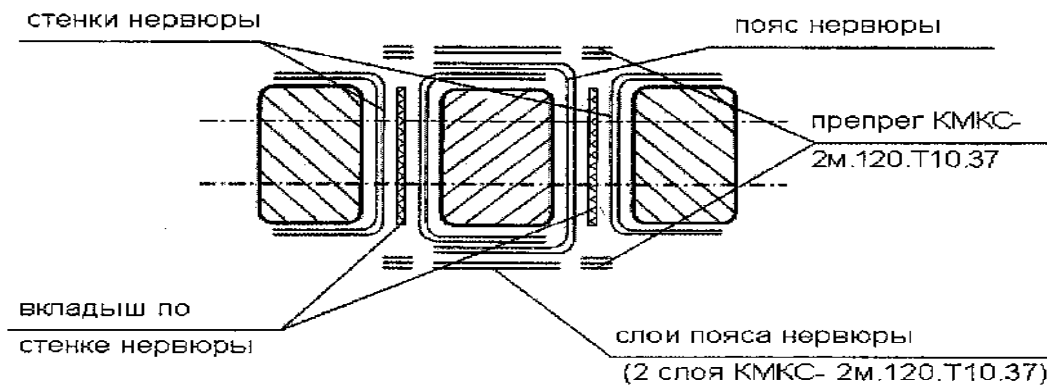


Рис. 8. Схема выкладки элементов двустенных нервюр для подформовки

Общую сборку и окончательное формование интегральной конструкции хвостового отсека руля направления, состоящую из двух (верхней и нижней) панелей трёхслойных сотовых конструкций, десяти нервюр (одностенных и двустенных), производить следующим образом:

- установить на нижнюю полуформу и зафиксировать наружную (нижнюю) трёхслойную сотовую панель;

- снять с внутренней поверхности нижней панели жертвенный слой. После снятия жертвенного слоя запрещается прикасаться к поверхности панели руками без перчаток;

- провести визуальный контроль удаления жертвенного слоя;

- на нижней панели разметить согласно чертежу оси нервюр и границы полок нервюр и законцовки мягким карандашом. Проложить клеевую плёнку ВК-36 на всю ширину полок нервюр;

- раскроить и выложить в соответствии с чертежом по задней кромке нижней панели три слоя клеевой плёнки ВК-36А и два слоя препрега КМКУ, чередуя их между собой. Защитную плёнку с верхнего слоя клеевой плёнки ВК-36А снимать непосредственно перед закрытием формы;

- установить одностенные нервюры;

- установить оправки в сборе с подформованными нервюрами на нижнюю панель.

При установке нервюр следить за отсутствием перекоса по нанесённой разметке;

- прижать каждую нервюру к нижней панели, фиксируя её на панели за счёт липкости препрега и клеевой пленки ВК-36;

- снять крепёж и удалить оправки, не отрывая стенки нервюр от вкладышей. Прикатать нижние полки нервюр к панели. Прикатать уголки перестыка нервюр и задней стенки;

- изготовить внутренние вакуумные мешки (плёнка полиамидная неориентированная марки ТС и плёнка полиамидная Ipplon KM1300 (фирма AIRTECH)), проложить разделительную плёнку



(плёнка фторопластовая), дренаж (2-3 слоя стеклоткани) (ткань Т-10-80, Т-10-14), установить внутренние вакуумные мешки;

- установить внутри вакуумного мешка технологическую планку по задней стенке, завернутую в один слой стеклоткани. Установить технологические вкладыши, завернутые в один слой стеклоткани, справа и слева от нервюр, зафиксировать их;

- установить оправки в сборе с подформованными двустенными нервюрами на нижнюю панель. При установке нервюр следить за отсутствием перекоса по нанесённой разметке;

- прижать каждую нервюру к нижней панели, фиксируя её на панели за счёт липкости препрега и клеевой плёнки ВК-36;

- снять правые и левые оправки. Прикатать нижние полки нервюр к панели. Прикатать уголки перестыка нервюр и задней стенки;

- изготовить внутренние вакуумные мешки, установить их между сформированными нервюрами;

- установить в вакуумные мешки технологические планки, завернутые в один слой стеклоткани. Установить технологические вкладыши, завернутые в один слой стеклоткани, зафиксировать их на нижней полуформе;

- склеить вакуумные мешки между собой уплотнительным жгутом в местах возможных отверстий в вакуумных мешках на технологических вкладышах; проложить дополнительный жгут вокруг отверстий и нижней плиты приспособления;

- уложить клеевую плёнку ВК-36 на полки нервюр и заднюю кромку на нижней панели;

- установить на верхнюю полуформу и зафиксировать наружную (верхнюю) трёхслойную сотовую панель. Снять с внутренней поверхности верхней панели жертвенный слой;

- собрать нижнюю полуформу с верхней, установить термомпары согласно схеме, разработанной для используемой оснастки, положить дренажный слой, изготовить общий вакуумный мешок. Провести подготовительные операции к автоклавному формованию. При проверке герметичности вакуумного мешка для поиска утечек должен применяться течеискатель LEQ-70;

- провести автоклавное формование по режиму, ранее рассмотренному при формовании монолитного вкладыша для одностенной нервюры.

- после окончания процесса формования извлечь из автоклава форму, разобрать технологический пакет;

- произвести механическую обработку (обрезку технологического припуска) хвостового отсека, сотового заполнителя в соответствии с требуемыми рекомендациями. Кромки деталей, по которым проводилась механическая обработка, покрыть клеем ВК-27. Клей ВК-27 наносить в два слоя перекрытием 2...5 мм. Второй слой наносить после отверждения и зашкурирования первого слоя;

- предъявить готовое изделие ОТК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусева, Р. И. Особенности производства композиционных полимерных изделий в самолётостроении: учеб. пособие / Р. И. Гусева. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2017. – 152 с.
2. Иванов, Ю. Л. Современные технологии авиастроения / Ю. Л. Иванов, Б. Н. Марьин, А. Г. Братухин. – М.: Машиностроение, 1999. – 532 с.

Иванов С. Н., Дадынский А. А., Дацко К. Д., Клеменко В. К.
S. N. Ivanov, A. A. Dadynsky, K. D. Datsko, V. K. Klemenko

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ С ЛИНЕЙНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

EFFICIENCY ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL DRIVES WITH EXECUTIVE ELEMENT LINEAR MOVEMENT

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Dr. hab. of Engineering, Professor, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Дадынский Алексей Алексеевич – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Aleksey A. Dadynsky – a student, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Дацко Константин Дмитриевич – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Konstantin D. Datsko – a student, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Клеменко Владимир Константинович – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Vladimir K. Klemenko – a student, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Аннотация. В статье приведён анализ и рассмотрены основы оценки эффективности электромеханических преобразователей с линейным перемещением исполнительного элемента в сравнении с традиционными (пневматическими, гидравлическими и т. д.) линейными приводами. Приведены результаты расчёта теоретических тяговых усилий, обеспечиваемых рассматриваемыми устройствами. Дано краткое описание существующих конструкций. Обоснован выбор ограничивающих факторов применительно к объекту исследования. Рассмотрена физическая реализация преобразователя и приведены рекомендации по его проектированию и эксплуатации. Установлены основные критерии функциональной эффективности и проведён структурный анализ рассматриваемого привода с целью выделения стандартных элементов для выбора адаптированных методик и последующего использования при проектировании. В частности, синтез механизма линейного перемещения может быть проведён на основе известных в машиностроении подходов. В статье показано, что данный класс устройств может проектироваться и исследоваться на основе классического электромеханического преобразователя переменного тока (ЭМПЛП). Определены основные этапы разработки и установлены соответствия между техническими характеристиками базовых электромеханических преобразователей и выходными параметрами ЭМПЛП.

Summary. The article analyzes and discusses the basics of evaluating the efficiency of electromechanical drives with the executive linear movement in comparison with traditional (pneumatic, hydraulic, etc.) linear drives. The results of the calculation of the theoretical traction forces provided by the considered devices are given. A brief



description of the existing structures is presented. The choice of limiting factors in relation to the object of study is substantiated. The physical implementation of the converter is considered and recommendations for its design and operation are given. The main criteria of functional efficiency are established and a structural analysis of the considered drive is carried out with the aim of identifying standard elements for the selection of adapted techniques and subsequent use in the design. In particular, the synthesis of the linear displacement mechanism can be carried out based on approaches known in mechanical engineering. The article shows that this class of devices can be designed and investigated on the basis of the classical electromechanical converter of alternating current (EMPLP). The main stages of development and determination of the correspondence between the technical characteristics of the basic electromechanical transducers and the output parameters of the EMPLP are determined.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, приводной механизм, тяговые характеристики.

Key words: electromechanical converter, drive mechanism, traction characteristics.

УДК 621.31: 621.25

Введение

Одним из структурных элементов современных технических комплексов, применяемых в различных сферах человеческой деятельности, традиционно составляют приводы, использующие электромеханические преобразователи.

В табл. 1 показаны области применения приводов и приведено сравнение некоторых характеристик существующих приводов.

Таблица 1

Области применения и характеристики приводов линейного перемещения

Вид привода	Области применения	Достоинства	Недостатки
Грузовой	Возвратные механизмы	Автономность; электро- и пожаробезопасность; отсутствие специальных источников энергии	Низкие динамические и регулировочные характеристики
Пружинный	Электротехнические изделия	Электро- и пожаробезопасность; отсутствие специальных источников энергии, простота конструкции	Усталость материала пружин; невысокое быстродействие
Тепловой	Системы автоматики и защиты	Простота конструкции; не требуется первичный источник электрической энергии; пожаро- и электробезопасность; автономность;	Старение исполнительного элемента; низкая чувствительность и быстродействие
Пневматический	Промышленное оборудование, транспорт	Относительная простота конструкции исполнительного механизма и его технического обслуживания; пожаро- и взрывобезопасность; широкий диапазон рабочих температур; возможность эксплуатации в условиях загрязнённой среды; высокое быстродействие; отсутствие необходимости в защитных устройствах от перегрузки давлением; безопасность	Высокая стоимость пневмоэнергии; относительно большой вес и габариты; нестабильность скорости перемещения; высокий уровень шума; низкая скорость передачи сигнала

Продолжение таблицы 1

Вид привода	Области применения	Достоинства	Недостатки
Гидравлический	Горнодобывающая промышленность; машиностроение; авиационная и автомобильная промышленность	Способность развивать очень большое усилие при низких размерных соотношениях; возможность удалённости от насосной станции; низкое время развития усилия; плавная регулировка; широкий температурный диапазон; высокий КПД	Возможность утечки рабочей жидкости, особенно при высоком давлении; большие потери мощности при большой протяжённости; высокая температурная зависимость; высокая стоимость оборудования и его техобслуживания; постоянное потребление энергии; структурная сложность
Электромагнитный	Электрические аппараты; технологическое оборудование; охранные комплексы	Простота конструкции и эксплуатации; высокая надёжность; высокая совместимость; возможность самовосстановления исходного состояния	Большое время включения для мощных нагрузок; высокое потребление энергии
Электромеханический	Промышленное оборудование; транспорт; коммунальное хозяйство; бытовая техника	Структурная простота конструкции всей системы; высокие регулировочные характеристики; возможность полной автоматизации; низкий уровень шума и вибрации; экологичность	Сложность применения в пожароопасных зонах, взрывоопасных средах и при повышенной влажности защищённого привода исполнения; относительно высокая стоимость; возможность перегрева при длительной работе с перегрузкой; создание электромагнитных помех

Большинство из приведённых в табл. 1 видов приводов обеспечивает линейное перемещение исполнительного механизма. Такие приводы находят применение практически во всех технических системах: от механизма стеклоподъёмника автомобиля до установок перемещения уникальных зданий и сооружений. Сравнение характеристик приводов различного типа показывает, что наиболее эффективным по большинству показателей является электромеханический привод, поскольку именно он имеет наиболее широкий диапазон регулирования и максимально адаптирован для применения в автоматизированных комплексах. При этом, несмотря на очевидную целесообразность конструктивного исполнения рассматриваемого приводного устройства линейного перемещения, проектируемого на основе классического электромеханического преобразователя переменного тока (ЭМПЛП), в научно-технической литературе отсутствует не только количественный анализ технико-экономических показателей таких приводов по сравнению с традиционными (пневматическими, гидравлическими и т. д.), но и даже примеры возможного использования аналогичных конструкторских решений, что подтверждает актуальность их исследования и разработки.

Постановка задачи исследования

Начальным этапом исследования является установление основных критериев функциональной эффективности и проведение структурного анализа рассматриваемого привода с целью выделения стандартных элементов для выбора адаптированных методик их последующего использования при проектировании. В частности, синтез механизма линейного перемещения может быть проведён на основе известных в машиностроении подходов [1; 2].

Следующим этапом является установление соответствия техническими характеристиками базовых электромеханических преобразователей и выходными параметрами ЭМПЛП и разработка инженерной методики. В табл. 2 приведены расчётные (без учёта потерь в винтовом сопряжении)

характеристики электромеханических преобразователей с линейным перемещением исполнительного механизма на базе энергосберегающих асинхронных двигателей серии 7AVE.

Таблица 2

Расчётные характеристики электромеханических преобразователей с линейным перемещением исполнительного механизма

$P_{2н}$, кВт	V , м/с	F_p , кН		$P_{2н}$, кВт	V , м/с	F_p , кН		$P_{2н}$, кВт	V , м/с	F_p , кН
2p=2				2p=4				2p=6		
4	0,02	220		8	0,02	400		4	0,04	42,6
9	0,05	180		11,2	0,04	280		7	0,06	60,4
12	0,08	150		12,5	0,06	210		11	0,083	132,53
15	0,2	75		15	0,125	120		15	0,083	180,72
18,5	0,2	92,5		18,5	0,125	148		18,5	0,092	201,1
22	0,25	88		22	0,1375	160		22	0,092	239,13
30	0,25	120		30	0,1375	218,2		30	0,092	326,1
37	0,275	134,54		37	0,1375	269,1		37	0,1	370
45	0,275	163,64		45	0,1375	327,3		45	0,1	450
48	1	48		68,5	1	68,5		75	1	75
48	2	22		81,5	2	40,7		87,5	2	43,75
50,5	3	16,8		97,5	3	32,5		105	3	35
52,8	4	13,2		106,7	4	26,6		110	4	27,5
60	5	12		116	5	23,2		118,7	5	23,75
65	6	10,8		118,3	6	19,7		120	6	20

На рис. 1 показаны результаты аппроксимации расчётных данных с использованием пакета Statistica 12. Анализ расчётных данных показывает, что развиваемые ЭМПЛП удельные тяговые характеристики существенно превышают аналогичные параметры традиционных пневматических и гидравлических приводов.

Общее техническое решение электромеханического преобразователя с линейным перемещением исполнительного элемента показано на рис. 2 и подробно описано в работе [3]. Согласно рис. 2 показан привод с линейным перемещением исполнительного элемента на базе электромеханического преобразователя, состоящего из магнитопровода с размещённой на нём сетевой обмоткой 1, отделённой воздушным зазором 2 от вращающейся короткозамкнутой вторичной обмотки 3, на внутренней поверхности которой нанесена резьба, посредством которой перемещается вал 4. Такое устройство конструктивно объединяет приводной и исполнительный механизмы, что позволяет исключить дополнительное передаточное устройство и, соответственно, повышает эффективность привода.

Критериями работоспособности механизма линейного перемещения ЭМПЛП являются прочность элементов резьбовой части ротора и тяги, а также устойчивость тяги при продольных изгибающих усилиях в случаях нагружения изгибающими и растягивающими силами. Методика проектирования предусматривает проверочный расчёт, позволяющий определить и обеспечить параметры механизма линейного перемещения, соответствующие заданным критериям при заданных размерных соотношениях базового двигателя. Исходными данными для выполнения проектного расчёта дополнительно являются величина наибольшего осевого перемещения тяги относительно ротора, наибольшая осевая нагрузка с учётом направления её приложения. В случае электромеханического привода должна быть задана линейная скорость перемещения тяги в осевом направлении при постоянной частоте вращения ротора и рекомендуемом шаге резьбы, зависящем от диаметра вала двигателя. Такие эксплуатационные требования к приводу, как, например, необходимость выполнения условия электромагнитного торможения, задаются дополнительно и учитываются отдельно.

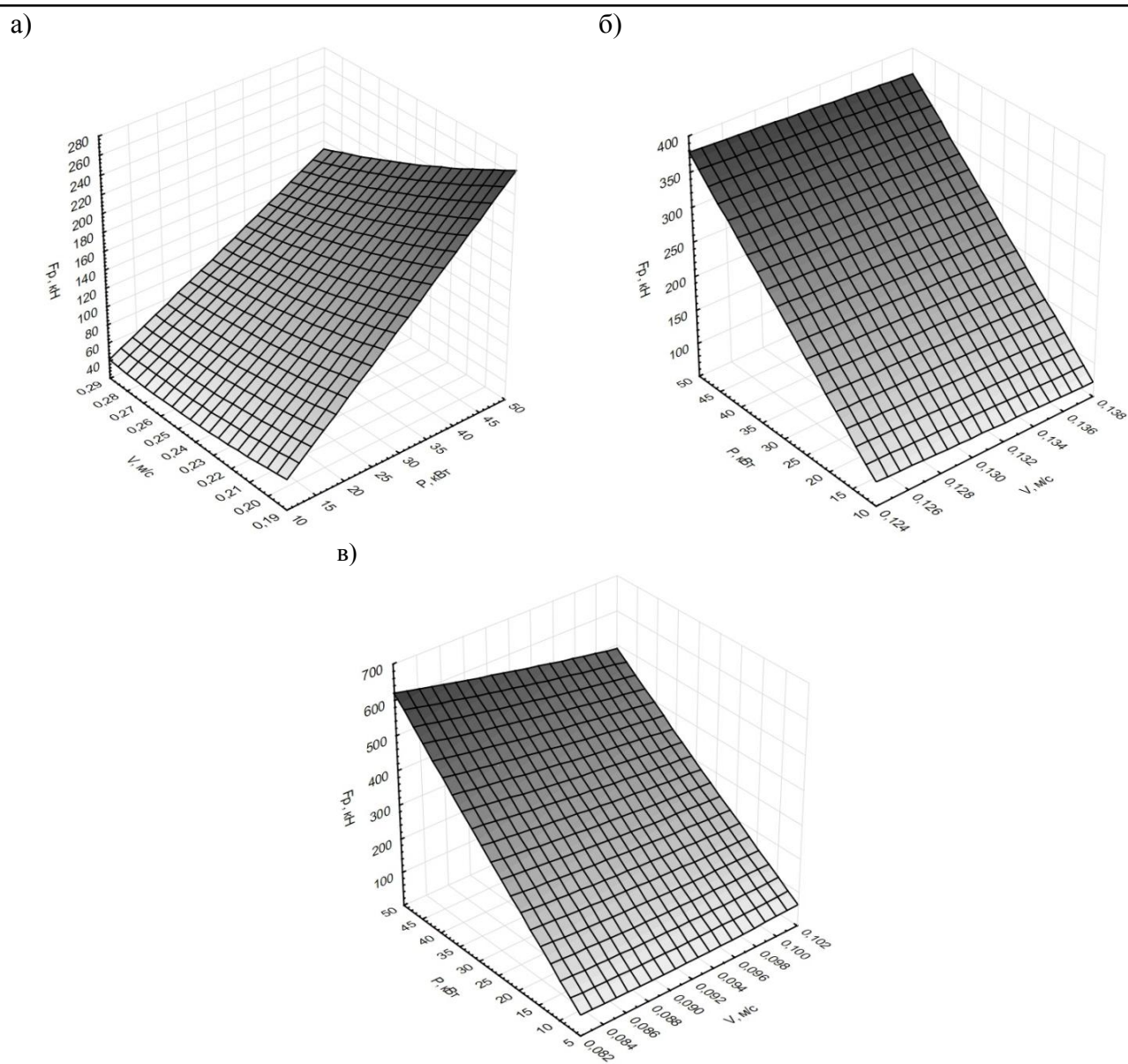


Рис. 1. Визуализация расчётных характеристик привода:
 а – $2p=2$; б – $2p=44$; в – $2p=6$

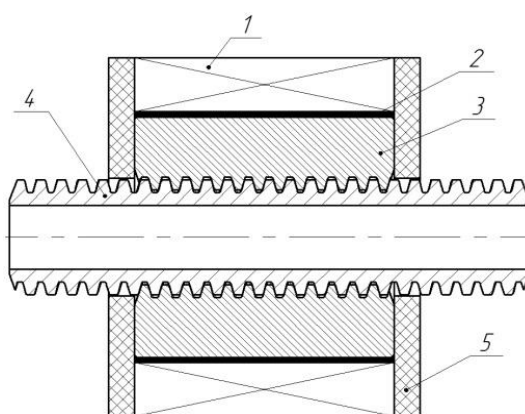


Рис. 2. Электромеханический преобразователь с линейным перемещением

Теоретические основы исследования

Теоретической основой исследования критерия эффективности является известная в электромеханике модель обобщённого электромеханического преобразователя [4]. Учёт особенностей исследуемого электропривода сводится к дополнению математической модели модифицированным уравнением тяговой характеристики механизма линейного перемещения, полученной на основе методики, приведённой в работе [1]:

$$M_{вр} = 0,5F_p d_2 \left(\frac{D_{cp}}{d_2} f + tg(v + \varphi) \right), \quad (1)$$

где $M_{вр}$ – вращающий момент на валу; d_2 – диаметр резьбовой части вала; D_{cp} – средний диаметр нарезанной части вращающегося ротора; f – коэффициент трения в резьбовом соединении; v – угол подъёма резьбы; $\varphi = \arctg f_{пр}$; $f_{пр}$ – приведённый коэффициент трения с учётом угла профиля.

Уравнения обобщённого электромеханического преобразователя совместно с уравнением (1) позволяют определить тяговую характеристику электромеханического преобразователя с линейным перемещением исполнительного элемента при заданных параметрах базового двигателя.

Принимая в качестве известной в теории надёжности модели «слабейшего звена» резьбовое соединение комбинированного привода и проводя анализ механических передач в условиях скольжения, можно считать, что для тяги, на которую действует растягивающая нагрузка, также как и для нагрузок сжатия, превышающих 20...25 кН для приведённых длин не более 0,5 м, основным критерием работоспособности является скорость износа резьбового сопряжения. Эти вопросы могут быть исследованы при использовании подходов, используемых при решении аналогичных задач в машиностроении [1; 2].

На основе предложенного подхода на базе стандартного шестиполусного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 1,1 кВт спроектирован и испытан ЭМПЛП, а вид приводной установки показан на рис. 3.

На рис. 4 приведена зависимость тягового усилия исследуемого устройства. В качестве управляющих переменных использованы величины полезной мощности P_2 и скольжения s , управляемой – тяговое усилие F_p .

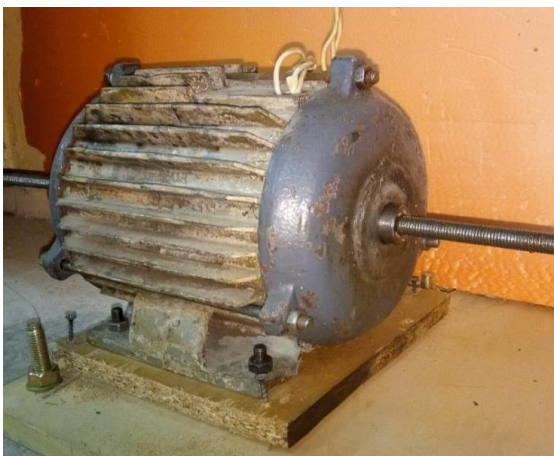


Рис. 3. Общий вид преобразователя

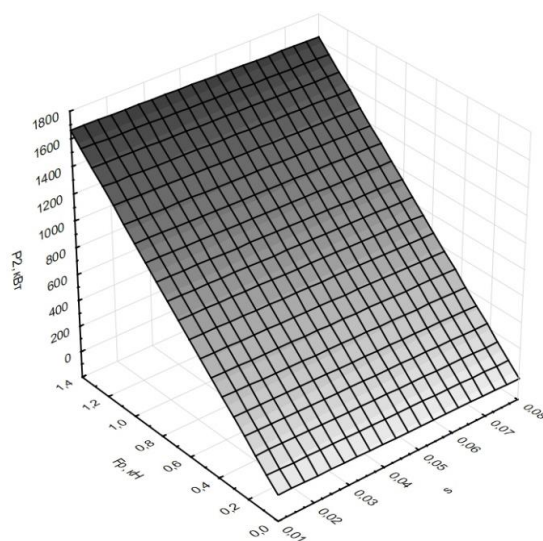


Рис. 4. Тяговая характеристика экспериментального электромеханического преобразователя с линейным перемещением исполнительного механизма

Заключение

В статье представлен анализ эффективности тяговых характеристик электромеханических приводов с линейным перемещением исполнительного элемента. Рассмотрены основные этапы проектирования на основе апробированных методик, используемых в машиностроительных и электромеханических расчётах. Полученные результаты являются основой для создания автоматизированных механизмов линейного перемещения и позиционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, М. Н. Детали машин / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – М.: Высш. шк, 2008. – 408 с.
2. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя / В. И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 1-3.
3. Пат. № 2 651 531 С1 Российская Федерация, МПК7 В61L 29/04. Автоматизированная пропускная система / О. С. Амосов [и др.]; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т. – № 2017113804; заявл. 20.04.2017; опубл. 19.04.2018. Бюл. № 11. – 2 с.
4. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1964. – 528 с.

Мизраки Д. А.
D. A. Mizraki

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ
ПОД «1С: ПРЕДПРИЯТИЕ 8»**

THE SYSTEM OF AUTOMATED TESTING DEVELOPMENT FOR «1С: ENTERPRISE 8»

Мизраки Дмитрий Алексеевич – аспирант кафедры теоретической информатики и дискретной математики Московского педагогического государственного университета (Россия, Москва); 119991, г. Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 1; тел.: +7 (903) 000-92-98. E-mail: mizrakid@gmail.com.

Mr. Dmitry A. Mizraki – post-graduate student of the Department of theoretical Informatics and discrete mathematics, Moscow state pedagogical University (Russia, Moscow); 119991, Moscow, Malaya Pirogovskaya str., 1, p. 1; tel.: +7 (903) 000-92-98. E-mail: mizrakid@gmail.com.

Аннотация. В статье представлено разрешение актуальной проблемы устранения ошибок в работе прикладных решений, вызванных некорректной разработкой программного обеспечения. Предложен подход для процесса автоматизированного тестирования прикладных решений, реализованный на технологической платформе «1С: Предприятие 8». На примере программного продукта «1С: Документооборот 8» продемонстрирован разработанный инструмент, позволяющий производить обновление информационной базы тестируемого прикладного решения из хранилища до актуальной версии. Предложенный подход к автоматизации процесса тестирования прикладного решения реализован с использованием программного решения «1С: Сценарное тестирование» и может быть использован для запуска различных прикладных программных продуктов. Разработанные сценарии, выполняемые под управлением сервера Microsoft Windows Server 2008, позволяют запускать имитацию интерактивных действий пользователя. Предложенный механизм успешно используется в отделе «Разработка программ документооборота» фирмы «1С».

Summary. The actual problem of eliminating errors when working with application solutions caused by incorrect software development has been solved. An approach for the process of automated testing of applied solutions implemented on the 1С: Enterprise 8 technological platform is proposed. On the example of the software product «1С: Document 8», a developed tool was demonstrated that allows updating the information base of the tested application solution from the repository to the current version. The proposed approach to automating the testing process of an application solution is implemented using the «1С: Scenario testing» software solution and can be used to launch various application software products. The developed scripts executed under control of the Microsoft Windows Server 2008 server, allow starting imitation of interactive actions of the user. The proposed mechanism is successfully used in the «Development of workflow programs» department of 1С company.

Ключевые слова: «1С: Предприятие 8», автоматизированное тестирование, интерактивный сценарий, документооборот.

Key words: 1С: Enterprise 8, automated testing, interactive script, document flow.

УДК 004.6

Актуальность работы

Существует проблема некорректной работы действующих программных продуктов, вызванной пропуском ошибок при их разработке и модернизации.

Для повышения качества данного программного продукта и автоматизации тестирования информационных баз «1С: Документооборот 8» необходимо для выполнения тестирования за одно действие пользователя модернизировать существующий механизм, использующий «1С: Сценарное тестирование».

Одно из распространённых программных решений для автоматизации взаимодействия работников и оборота документов на предприятии может быть представлено конфигурацией «1С: Документооборот» [1], созданной на технологической платформе «1С: Предприятие 8.3».

Решение «1С: Документооборот 8» позволяет упорядочить работу сотрудников с документами, сократить время поиска необходимой информации; уменьшить суммарное время коллективной обработки документов; повысить качество готового материала (проектов, документации и пр.); решать задачи автоматизации учёта документов; производить взаимодействия сотрудников; производить контроль и анализ исполнительской дисциплины; вести учёт затрат рабочего времени сотрудников, построенный на основе ежедневных отчётов о проделанной работе.

В процессе разработки «1С: Документооборот 8» используется ручное и автоматизированное тестирования, выполняемые конфигурацией «1С: Сценарное тестирование 8» [2] для контроля качества продукта.

Система автоматизированного тестирования «1С: Сценарное тестирование 8» представляет собой инструментарий для проверки работоспособности любой конфигурации «1С: Предприятие 8» с помощью имитации интерактивных действий пользователя [3].

Для описания выполняемых интерактивных действий используется встроенный язык платформы «1С: Предприятие 8.3» [4], в который добавлены новые объекты, описывающие интерфейс приложения (окна, формы, элементы управления и т. п.) и действия пользователей (навигация по конфигурации, ввод данных и т. п.).

Интерфейс «1С: Сценарное тестирование 8» реализован с помощью внешней обработки (см. рис. 1) и предназначен для запуска последовательности интерактивных действий, описанных тестовыми сценариями. При выполнении тестирования используются два вида приложений – менеджер и клиент тестирования. Менеджер устанавливает связь с клиентом и выполняет описанный тестовый сценарий.

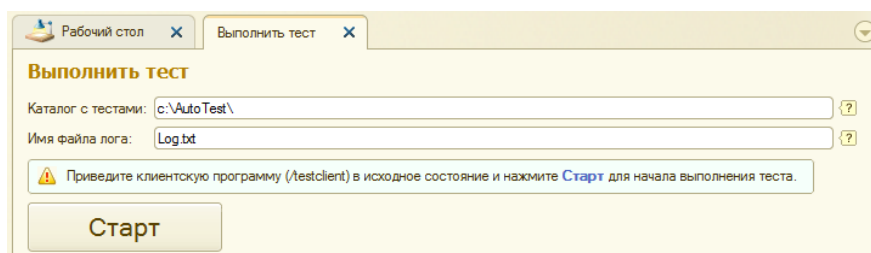


Рис. 1. Внешняя обработка RunTests

Поэтому в настоящее время задача автоматизированного тестирования разрабатываемых прикладных решений на базе платформы «1С: Предприятие 8.3» является **актуальной**.

Цель работы

Предлагается разработать модернизированный механизм автоматизированного тестирования прикладных решений, позволяющий значительно ускорить процесс запуска данной операции.

Предложенный модернизированный механизм должен выполняться на выделенном сервере Windows Server 2008. Система тестирования должна иметь возможность производить ежедневное обновление конфигурации до актуальной версии из хранилища и выполнять все имеющиеся автотесты за одно действие пользователя.

Особенность работы заключается в создании подхода к автоматизации процесса тестирования прикладного решения на примере конфигурации «1С: Документооборот». Предложенный подход реализован на платформе «1С: Предприятие 8.3» с использованием программного решения «1С: Сценарное тестирование». Его можно использовать для запуска и других прикладных продуктов.

Разработанный модернизированный подход используется для адаптации «1С: Сценарное тестирование» под нужды отдела «Разработка программ документооборота», выполняющего разработку «1С: Документооборот 8».

Реализация подхода

Процесс тестирования информационных баз был модернизирован при помощи использования языка сценариев Visual Basic Script операционной системы Microsoft Windows. Модернизированный подход позволяет обновлять и запускать на исполнение информационную базу за одно действие пользователя.

На выделенном сервере Windows Server 2008 была установлена и настроена система тестирования информационной базы, включающая в себя ежедневное обновление конфигурации до актуальной версии и выполнение всех имеющихся автотестов.

«1С: Предприятие 8» поддерживает два варианта работы: файловый и клиент-серверный, поэтому для каждого из вариантов был реализован набор программных сценариев.

Тестирование файловой версии информационной базы

Файловый вариант работы с информационной базой рассчитан на работу небольшого количества пользователей в локальной сети или одного пользователя. При этом варианте все данные информационной базы (конфигурация, база данных, административная информация) располагаются в одном файле (см. рис. 2). Для работы с информационной базой требуются только операционная система и платформа «1С: Предприятие 8».

Преимуществами файлового варианта является обеспечение высокой целостности информационной базы и простое создание резервных копий.

При файловом варианте резервное копирование может осуществляться путём простого копирования файла информационной базы.

Механизм тестирования информационной базы «1С: Документооборот 8» в файловом варианте был установлен на локальном компьютере. Механизм позволяет выполнять ежедневные операции обновления конфигурации до актуальной версии и выполнение всех имеющихся автотестов.

На рис. 3 изображён каталог, в котором выполняется автоматическое тестирование. Он состоит из эталонной базы, хранимой в папке SourceBase, набора автотестов, хранимого в папке Tests, и информационной базы, хранимой в папке WorkBase. Объектом тестирования является информационная база, запускающаяся в файловом варианте при помощи «1С: Предприятие».

Процесс автоматизированного тестирования заключается в выполнении программного сценария RunAllTests, который запускает:

- сценарий CleanBase (приводит папку с исходной рабочей базой к эталонному виду, удаляя текущее содержимое папки и копируя все файлы из папки SourceBase, в которой хранится последняя версия эталонной базы);
- сценарий UpdateBase (обновляет рабочую базу из хранилища);
- сценарий FirstStart (выполняет тестовое открытие базы, и в случае обновления базы до новой версии конфигурации выполняет соглашение с лицензией и ожидает начальное заполнение данных);
- сценарий SaveBase (сохраняет в папку с эталонной базой актуальную версию, удаляя текущее содержимое папки и копируя все файлы из папки WorkBase, в которой хранится последняя версия эталонной базы);
- сценарий ExportBase (выгружает эталонную базу с последней актуальной версией в аналогичную информационную базу, развёрнутую на сервере в формате dt-файла);
- сценарий StartBase (выполняет открытие базы с параметром запуска обработки RunTests (см. рис. 1), которая автоматически запускает прогон всех автотестов, содержащихся в папке Tests).

Тестирование клиент-серверной версии информационной базы

Клиент-серверный вариант предназначен для использования в рабочих группах или в масштабе предприятия. Он реализован на основе трёхуровневой архитектуры «клиент-сервер» (см. рис. 4).



Рис. 2. Расположение информационной базы в файловом варианте

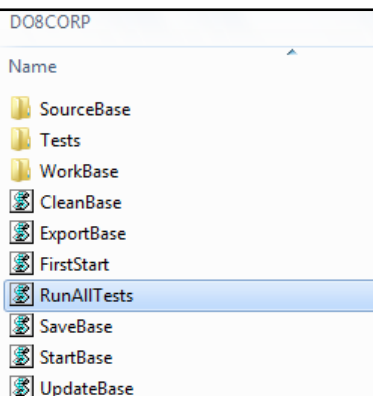


Рис. 3. Каталог информационной базы DO8CORP



Рис. 4. Расположение информационной базы в клиент-серверном варианте

При клиент-серверном варианте используются: клиентское приложение, сервер кластеров и база данных. При этом сервер баз данных и кластер серверов «1С: Предприятие 8» для распределения нагрузки могут быть установлены на одном или различных компьютерах.

При работе с базой данных клиент-серверная платформа использует возможности Microsoft SQL Server, такие как:

- механизм запросов (ориентирован на максимальное использование Microsoft SQL Server для выполнения расчётов и составления отчётов);
- просмотр больших динамических списков (обеспечивается без выполнения большого количества обращений к базе данных; при этом пользователю предоставляются возможности эффективного поиска, а также настройки отбора и сортировки).

Вычислительные операции по обработке данных выполняются кластером серверов «1С: Предприятие 8», что позволяет клиентской программе получать обработанную информацию. При этом увеличение вычислительной мощности кластера серверов менее затратно, чем обновление всех клиентских компьютеров при использовании файлового варианта.

Безопасный доступ к информационной базе осуществляется через кластер сервером «1С: Предприятие 8» по имени и паролю. При этом пользователю необязательно знать физическое расположение базы данных или конфигурации. Для подключения необходимо знать названия кластера и информационной базы.

Для администрирования в клиент-серверном варианте предусмотрено программное решение, позволяющее управлять информационными базами и подключением пользователей. Алгоритм создания базы данных в клиент-серверном варианте не отличается от файлового варианта.

Механизм тестирования информационной базы для клиент-серверного варианта был установлен на выделенном сервере Windows Server 2008. Разработанный механизм выполняет ежедневно операции обновления конфигурации до актуальной версии и выполнение всех имеющихся автотестов.

Каталог информационной базы представлен на рис. 5 и состоит из «эталонной базы», которая находится в файле DO8CORP_serv.dt; набора автотестов, находящегося в папке Tests. Тестируемая информационная база находится на сервере и запускается при помощи «1С: Предприятие 8» в клиент-серверном варианте.

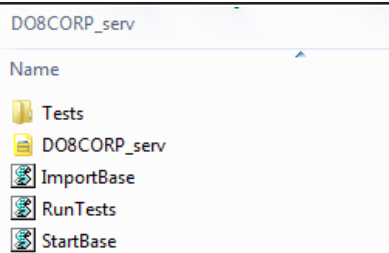


Рис. 5. Каталог
информационной базы
DO8CORP_serv

Процесс автоматизированного тестирования клиент-серверного варианта заключается в запуске на выполнение программного сценария RunTests, который запускает:

- скрипт ImportBase (загружает информационную базу с последней актуальной версией в информационную базу, на сервере);

- скрипт StartBase (выполняет открытие информационной базы с параметром запуска обработки RunTests (см. рис. 1) и автоматически запускает выполнение всех автотестов, содержащихся в папке Tests).

Заключение

В настоящей статье решена задача выполнения тестирования за одно действие пользователя при помощи модернизированного механизма с использованием «1С: Сценарное тестирование».

Предложен новый механизм автоматизации исполнения процесса тестирования на примере конфигурации «1С: Документооборот», реализованный на платформе «1С:Предприятие 8.3» с использованием конфигурации «1С: Сценарное тестирование».

Предложенный механизм успешно используется внутри отдела «Разработка программ документооборота» фирмы «1С».

ЛИТЕРАТУРА

1. Ульянцева, С. Э. «1С: Документооборот 8 КОРП». Комплект нормативных документов. Методика построения делопроизводства: практическое пособие / С. Э. Ульянцева. – М.: Фирма «1С», 2014.
2. 1С: Корпоративный инструментальный пакет 8. Версия 2.0. Руководство по использованию. – М.: ООО «1С-Публишинг», 2014.
3. Белов, А. В. Построение математической модели системы анализа характеристик качества информационно-управляющих систем масштаба предприятия / А. В. Белов, В. А. Смирнов // Качество. Инновации. Образование. – 2009. – № 4. – С. 37-42.
4. Материалы с сайта фирмы «1С» – v8.1c.ru. Обзор системы: технологическая платформа: общие механизмы: варианты работы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://v8.1c.ru/overview/CommonCommVariant.htm?printversion=1>.

Чёрный С. П., Васильченко С. А., Гудим А. С., Полей Е. О., Бузикаева А. В.

ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ НЕЧЁТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА С ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ФУНКЦИЯМИ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Чёрный С. П., Васильченко С. А., Гудим А. С., Полей Е. О., Бузикаева А. В.

S. P. Cherny, S. A. Vasilchenko, A. S. Gudim, Ye. O. Poley, A. V. Buzikaeva

ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ НЕЧЁТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА С ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ФУНКЦИЯМИ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

ONE OF THE APPROACHES TO IMPLEMENT THE MODEL OF THE FUZZY LOGICAL REGULATOR WITH SPATIAL FUNCTIONS OF ACCESSORIES

Чёрный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keraпу@knastu.ru.

Mr. Sergey P. Cherny – PHD in Engineering, associate Professor, Electric drive and automation of industrial installations Department of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keraпу@knastu.ru.

Васильченко Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keraпу@knastu.ru.

Mr. Sergey A. Vasilchenko – PHD in Engineering, associate Professor, Electric drive and automation of industrial installations Department of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keraпу@knastu.ru.

Гудим Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: eрапу@knastu.ru.

Mr. Alexander S. Gudim – candidate of technical Sciences, associate Professor, associate Professor of electric drive and automation of industrial plants of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: eрапу@knastu.ru.

Полей Евгений Олегович – магистр Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keraпу@knastu.ru.

Mr. Yevgeny O. Poley – Master's Degree student of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keraпу@knastu.ru.

Бузикаева Алина Валерьевна – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keraпу@knastu.ru.

Alina V. Buzikaeva – Master's Degree student of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keraпу@knastu.ru.

Аннотация. В работе представлена модель нечёткого логического регулятора с пространственными функциями принадлежности. Структурное решение такой интеллектуальной системы включает в себя четыре нечётких регулятора, три из которых используют алгоритмы вывода Мамдани, четвёртый представляет собой интеллектуальное переключающее устройство с алгоритмом вывода Сугено.

Summari. The paper presents a model of fuzzy logic controller with spatial membership functions. The structural solution of such an intelligent system includes four fuzzy regulators, three of which use the Mamdani output algorithms, the fourth is an intelligent switching device with the Sugeno output algorithm.

Ключевые слова: нечёткий логический регулятор с алгоритмом вывода Мамдани, интеллектуальное переключающее устройство с алгоритмом вывода Сугено, интеллектуальная система управления.

Key words: fuzzy logic controller with Mamdani output algorithm, intelligent switching device with Sugeno output algorithm, intelligent control system.

УДК 681.5.01:658.5

Введение

Системы управления, разрабатываемые или дополняемые нечёткой логикой, развиваются с высокой скоростью. Это связано с тем, что системы управления, содержащие элементы нечёткой логики, позволяют управлять там, где вычислительные алгоритмы бессильны.

Таким образом, система управления на базе нечёткой логики способна принимать решения, близкие к действиям инженера, то есть обучаться и подстраиваться под изменяющиеся условия окружающей среды [3].

Актуальность технологии заключается, прежде всего, в тенденции увеличения сложности математических моделей реальных систем и процессов управления, связанной с желанием повысить их адекватность и учесть всё большее число различных факторов, оказывающих влияние на процессы принятия решений. В работе рассмотрена возможность моделирования нечёткой интеллектуальной системы с пространственными функциями принадлежности для управления сложными технологическими объектами, которые чаще всего обладают свойствами уникальности, слабоструктурированности и отсутствием формальных критериев существования. Нечёткие регуляторы с пространственными функциями принадлежности позволяют организовывать процесс управления целым классом объектов, что в конечном результате приводит к формированию экспертной системы [6].

Для разработки управления системы будет использовано моделирование технологического процесса и непрерывно-детерминированный подход [5]. На рис. 1 изображена структурная схема электропривода.

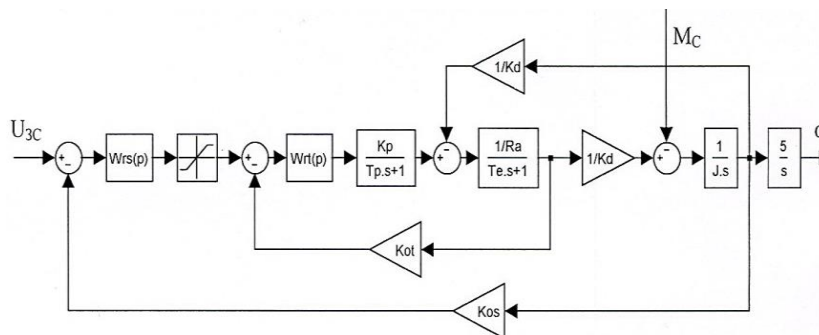


Рис. 1. Структурная схема электропривода с подчинённым регулированием тока и скорости

Для синтеза нечёткой системы управления с алгоритмом вывода Мамдани за основу принимается рассчитанная модель следящего электропривода. Классический регулятор положения заменяется нечётким регулятором с алгоритмом вывода Мамдани, что и показано на рис. 2.

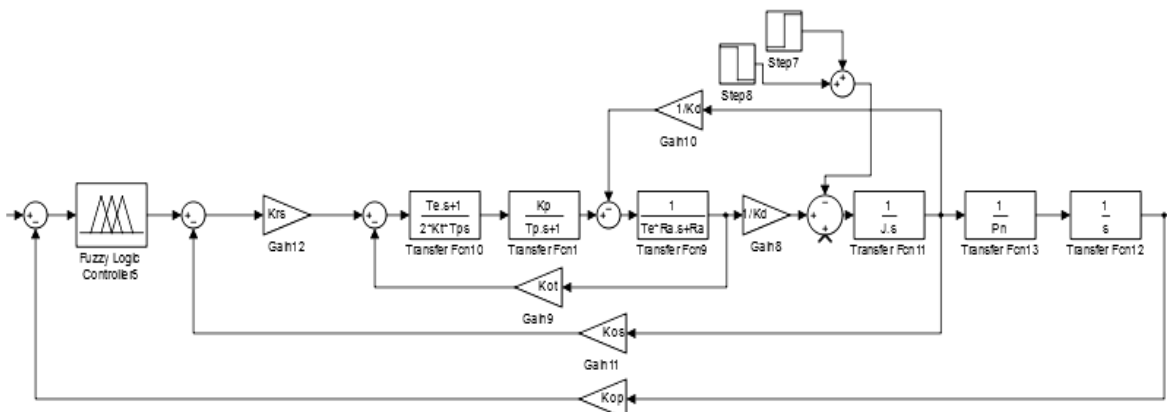


Рис. 2. Модель электропривода постоянного тока с нечётким регулятором

Нечёткий логический регулятор (НЛР) анализирует сигнал ошибки и имеет на своём входе лингвистическую переменную *input1*, выход регулятора формализуется одной лингвистической переменной *output1*. Функционирование данного регулятора осуществляется с применением нечёткого логического вывода Мамдани [2].

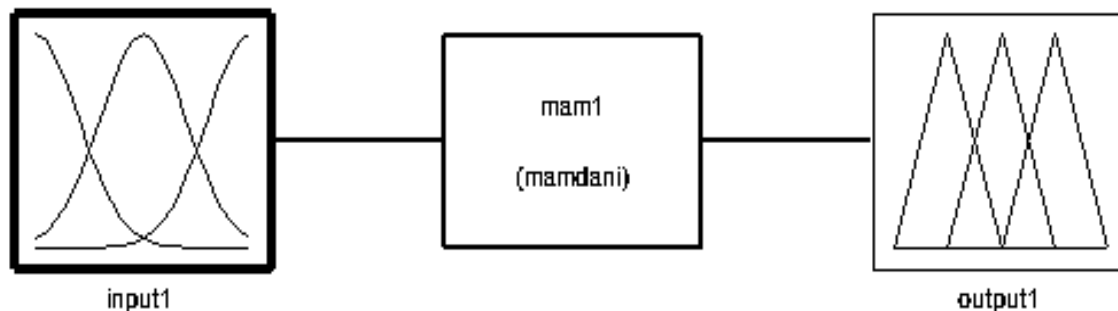


Рис. 3. Функциональная схема нечёткого логического регулятора

Лингвистическая переменная *input1* формализует понятия первого входного сигнала нечёткого регулятора – сигнал ошибки по положению. Выбор диапазона области определения лингвистических переменных производится по переходному процессу системы с классическим регулятором. В области определения базового терм-множества лингвистической переменной распределены пять аппроксимированных функций принадлежности нечётких переменных треугольного вида [4].

Лингвистическая переменная *output1* формализует понятия первого входного сигнала нечёткого регулятора – сигнал ошибки по положению. Выбор диапазона области определения лингвистических переменных производится по переходному процессу системы с классическим регулятором. В области определения базового терм-множества лингвистической переменной также распределены пять аппроксимированных функций принадлежности нечётких переменных треугольного вида.

Для формирования модели нечёткого регулятора с пространственными функциями принадлежности необходимо реализовать сложную многокаскадную интеллектуальную систему, включающую в себя ряд простейших регуляторов Мамдани, имеющих единственные функции принадлежности на входе и выходе и интеллектуальное переключающее устройство с алгоритмом вывода Сугено, обладающее единственной лингвистической переменной на входе и тремя информационными выходами [1].

Для формирования внутреннего каскада интеллектуальной системы необходимо уменьшить диапазон регулирования нечёткого регулятора Мамдани, представленного на рисунке 2, на 30 %, а также сформировать подобный регулятор с расширенным на 30 % диапазоном регулирования.

База знаний состоит из набора продукционных правил, остаётся неизменной для всех вышеприведённых регуляторов и имеет следующий вид:

1. Если «*input1*» есть *Z*, то «*output1*» есть *Z*.
2. Если «*input1*» есть *MP*, то «*output1*» есть *MP*.
3. Если «*input1*» есть *P*, то «*output1*» есть *P*.
4. Если «*input1*» есть *O*, то «*output1*» есть *O*.

Введём в систему интеллектуальное переключающее устройство, основной функцией которого будет моделирование функции принадлежности пространственной формы. Оно представляет собой нечёткий логический регулятор с алгоритмом вывода Сугено и тремя элементами умножения (см. рис. 4).

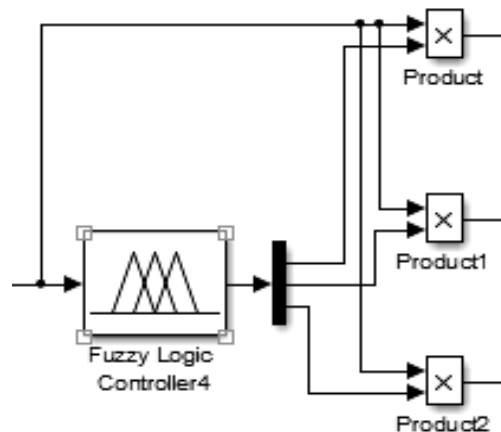


Рис. 4. Модель интеллектуального переключающего устройства

Нечёткий логический регулятор, представленный на рис. 5, анализирует сигнал ошибки и имеет на своём входе одну лингвистическую переменную *input1*; выход регулятора формализуется тремя лингвистическими переменными *output1*, *output2*, *output3*. Функционирование данного регулятора осуществляется с применением нечёткого алгоритма вывода Сугено.

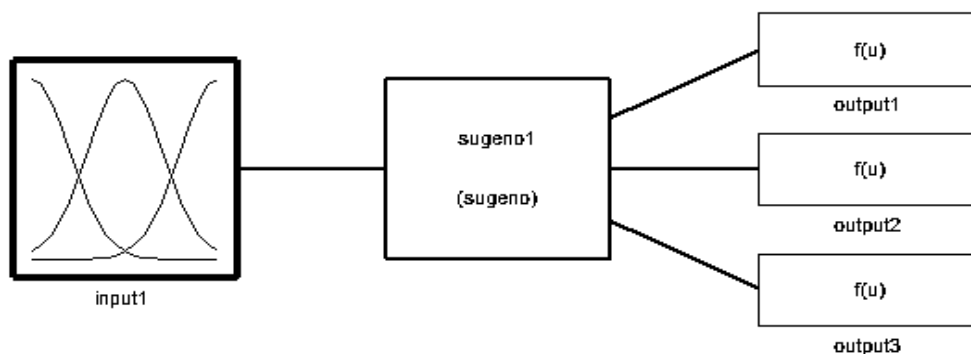


Рис. 5. Функциональная схема нечёткого логического регулятора

Лингвистическая переменная *input1* формализует понятия первого входного сигнала нечёткого регулятора – сигнал ошибки по положению. Область определения представляет собой диапазон $[0 \dots 10,4]$. В области определения базового терм-множества лингвистической переменной распределены три аппроксимированные функции принадлежности нечётких переменных в виде трапеций. Лингвистическая переменная *output1* формализует понятие выходного сигнала нечёткого регулятора. Область определения представляет собой диапазон $[0 \dots 1]$. Базовое терм-множество T (лингвистических переменных) – состоит из следующих элементов: $T = \{Z, P\}$, где Z – постоянная величина, равная нулю; P – постоянная величина, равная единице; названия нечётких переменных лингвистической переменной *output1*.

Нечёткая продукционная база знаний нечёткого логического регулятора представляет собой перечень из трёх правил и имеет следующий вид:

1. Если «*input1*» есть Z , то «*output1*» = 0, «*output2*» = 1, «*output3*» = 0.
2. Если «*input1*» есть P , то «*output1*» = 1, «*output2*» = 0, «*output3*» = 0.
3. Если «*input1*» есть MP , то «*output1*» = 0, «*output2*» = 0, «*output3*» = 1.

Применяя описанное выше структурное решение, можно получить следующую модель интеллектуальной системы управления с нечётким регулятором, формирующим пространственные функции принадлежности (см. рис. 6).

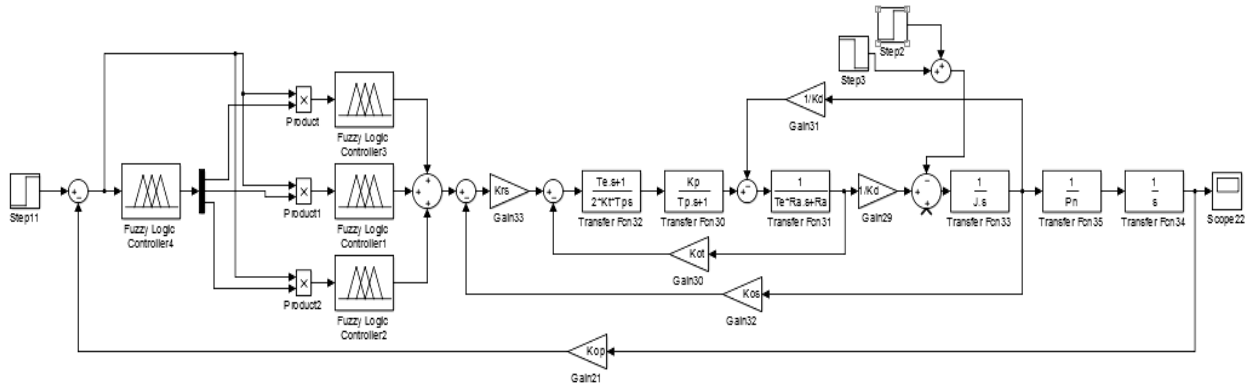


Рис. 6. Модель нечёткой системы управления

Проверка работоспособности системы заключается в изменении задающего сигнала на 30 % от исходной величины, тем самым формируются три сигнала со значениями 5,6 (-30 % от исходного), 8 (исходный сигнал), 10,4 (+30 % от исходного); на классическую систему подаются аналогичные сигналы задания. В результате моделирования получены следующие графики переходных процессов системы (см. рис. 7–9).

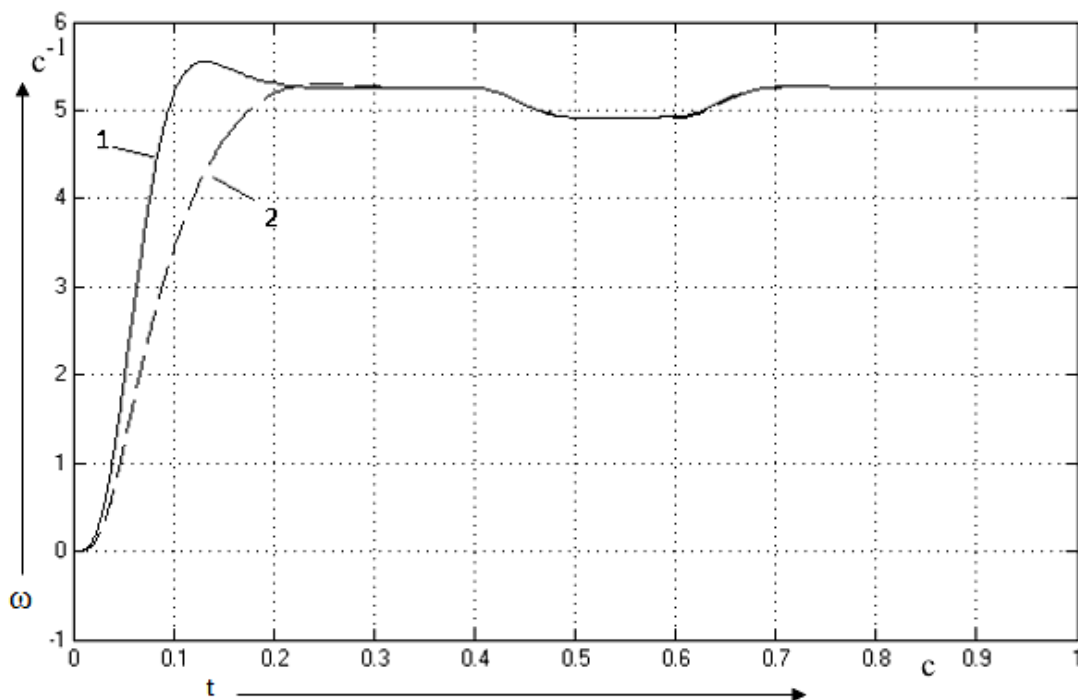


Рис. 7. Переходный процесс системы с классическим и нечётким регуляторами с управляющим сигналом -30 % от исходного:
1 – система с классическим регулятором; 2 – система с нечётким регулятором

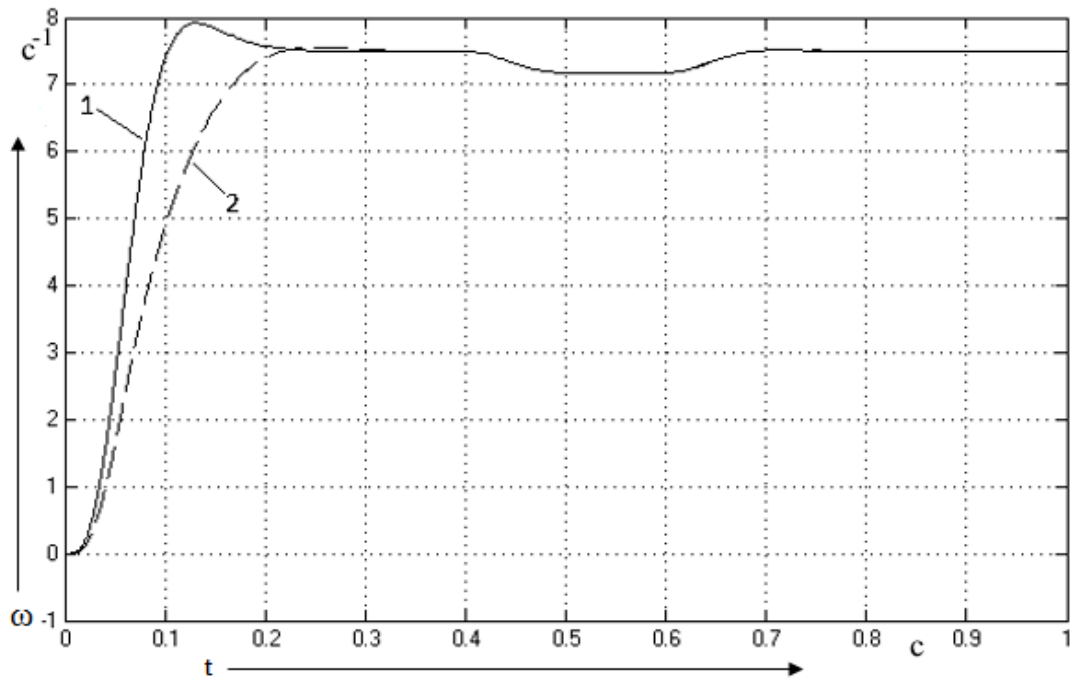


Рис. 8. Переходный процесс системы с классическим и нечётким регуляторами с исходным управляющим сигналом:
1 – система с классическим регулятором; 2 – система с нечётким регулятором

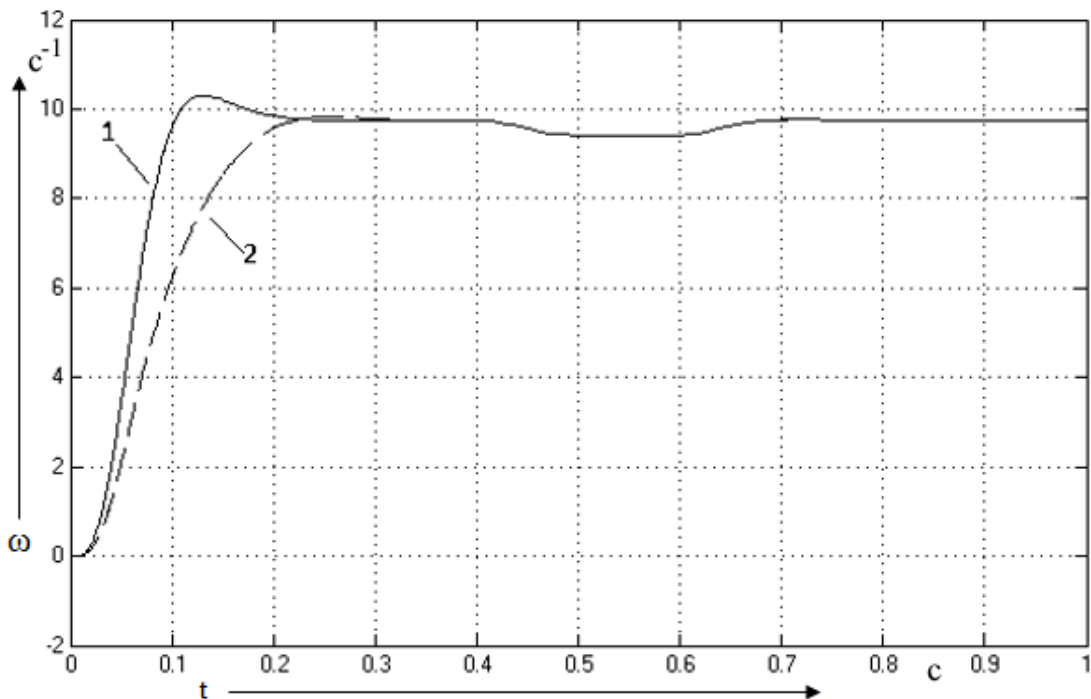


Рис. 9. Переходный процесс системы с классическим и нечётким регуляторами с управляющим сигналом +30 % от исходного:
1 – система с классическим регулятором; 2 – система с нечётким регулятором

Таким образом, для реализации пространственной формы функции принадлежности получим интеллектуальный регулятор, представленный на рис. 10.

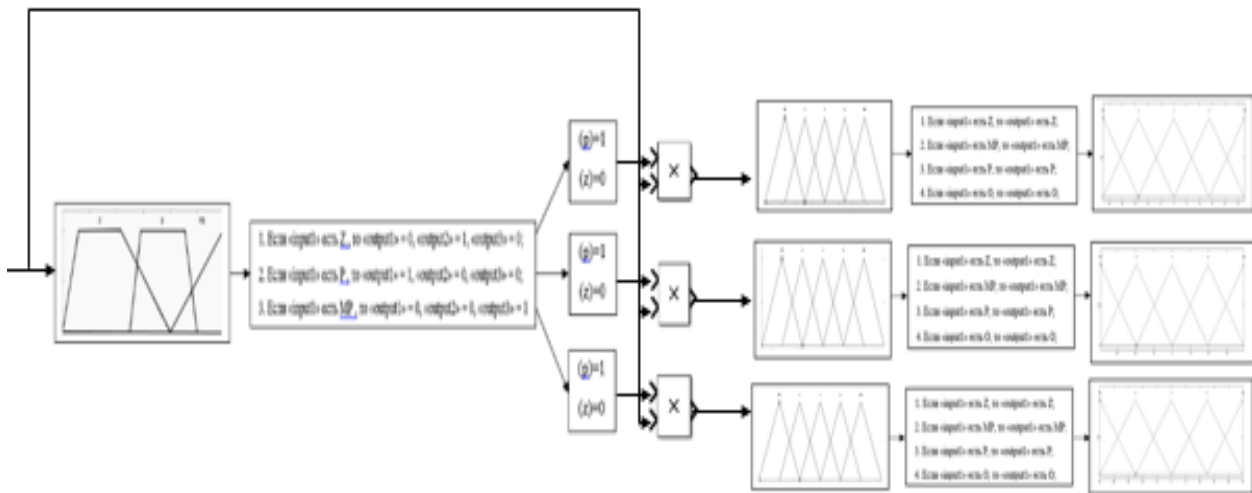


Рис. 10. Интеллектуальный регулятор с пространственными функциями принадлежности

Представленная интеллектуальная система, имеющая в своём составе двухкаскадный набор нечётких регуляторов, формирует пространственные функции принадлежности следующего вида (см. рис. 11).

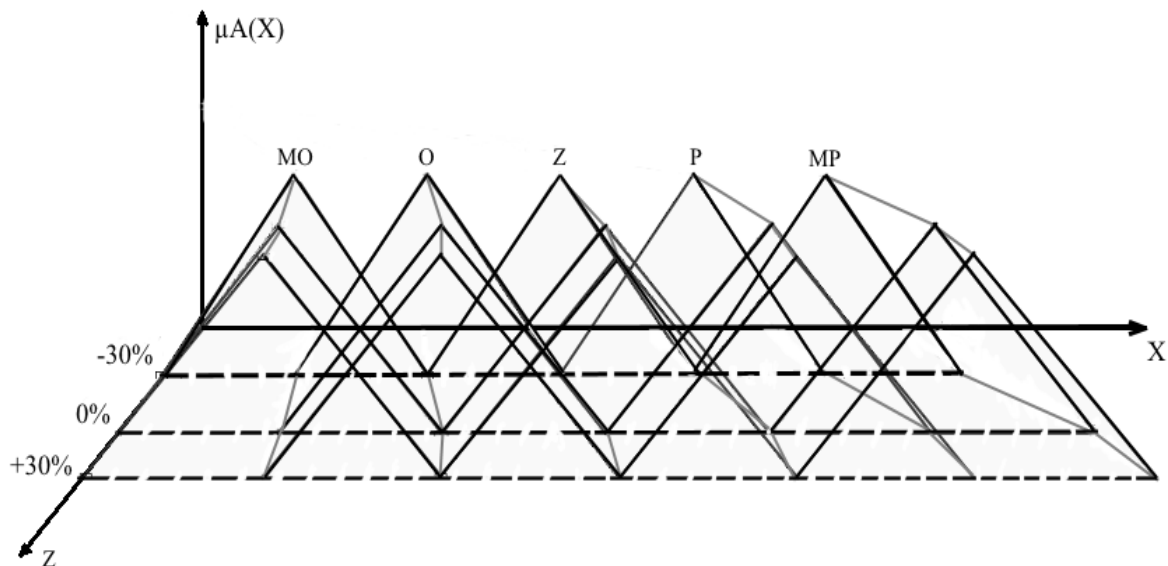


Рис. 11. Пространственные функции принадлежности

Представленные вариации сигналов не ограничивают возможности регулятора, он остаётся восприимчивым к изменениям внешних факторов вплоть до установленных крайних точек диапазонов регулирования. Такой подход к реализации нечётких систем позволяет существенно повысить универсальность интеллектуального регулятора, расширить его адаптивные свойства и значительно упростить процессы настройки и перенастройки, а также сократить информационную избыточность и алгоритмическую сложность таких регуляторов при их реализации в виде единого модуля.



Подводя итог вышеизложенному, можно заключить, что регуляторы, построенные с использованием классических методов, не обладают необходимой гибкостью, особенно при внедрении в систему недетерминированных возмущающих воздействий. Главным достоинством интеллектуальной системы управления является её гибкость и робастность к целому ряду как внешних, так и внутренних воздействий. Вместе с тем робастные свойства нечёткого регулятора ограничены некоторым пределом, что влечёт за собой необходимость более точной настройки при изменении внутренних параметров объекта регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев, В. А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами: учеб. пособие / В. А. Соловьев, С. П. Чёрный. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «КнАГТУ», 2006. – 74 с.
2. Соловьев, В. А. Многокаскадные нечёткие системы управления мобильной установкой пиролиза древесины / В. А. Соловьев, С. П. Чёрный, А. И. Малюкова. // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2010. – № 3. – С. 45-51.
3. Чёрный, С. П. Анализ влияния параметров объекта управления на основные характеристики нечёткого регулятора / С. П. Чёрный, А. В. Бузикаева, Е. О. Полей, Чжо Мин У // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1(33). – С. 28-33.
4. Чёрный, С. П. Нечёткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С. П. Чёрный, А. А. Гусаров // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № II-1(6). – С. 24-30.
5. Чёрный, С. П. Нечёткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С. П. Чёрный, Д. А. Новак // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – № 4(28). – С. 56-60.
6. Cherny, S. P. Another approach to enhancement of fuzzy controller intellectual capabilities / S. P. Cherny, V. A. Solovyev // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Xplore Conference Publications. – 2017. – P. 1-4.

Лелюхин В. Е., Колесникова О. В., Шпилев А. М., Давыдов Ю. А.
V. E. Lelyukhin, O. V. Kolesnikova, A. M. Shpilev, Yu. A. Davydov

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ ПРОЕКТИРОВАНИЕМ И ПРОИЗВОДСТВОМ

DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE MANAGEMENT OF DESIGN AND PRODUCTION

Лелюхин Владимир Егорович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии промышленного производства Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, Приморский край, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; тел.: + 7 (914) 723-52-57. E-mail: lelv0@mail.ru.

Mr. Vladimir E. Lelyukhin – PhD in Engineering, Assistant Professor, School of Engineering, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); 690091, Primorsky territory, Vladivostok, 8 Sukhanov str.; tel.: + 7 (914) 723-52-57. E-mail: lelv0@mail.ru.

Колесникова Ольга Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии промышленного производства Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, Приморский край, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; тел.: + 7 (914) 652-97-80. E-mail: miis@mail.ru.

Ms. Olga V. Kolesnikova – PhD in Engineering, Assistant Professor, School of Engineering, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); 690091, Primorsky territory, Vladivostok, 8 Sukhanov str.; tel.: + 7 (914) 652-97-80. E-mail: miis@mail.ru.

Шпилев Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Shpilev@knastu.ru.

Mr. Anatoly M. Shpilev – Dr.hab. of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Shpilev@knastu.ru.

Давыдов Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ректор Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47; тел.: + 7 (4212) 40-75-16. E-mail: rector@festu.khv.ru.

Mr. Yuriy A. Davydov – Doctor of Engineering, Professor, Rector of Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk territory, Khabarovsk, 47 Serysheva str.; tel.: + 7 (4212) 40-75-16. E-mail: rector@festu.khv.ru.

Аннотация. В настоящее время машиностроительные предприятия в процессе конструкторско-технологической подготовки и при выполнении работ широко используют цифровые технологии для эффективного планирования и управления. Разнородность и различная функциональность информационных систем привели к появлению проблем при создании интегрированных систем управления предприятиями и корпорациями. В представленной статье предлагается подход к решению сложившихся проблем. Авторами разработана концепция построения единого информационного пространства на основе функциональной модели предприятия. Базовыми элементами единого информационного пространства являются конструкторско-технологическая информация об изделиях и информация о текущем состоянии производственных ресурсов предприятия. Оригинальность и эффективность предложенной структуры информационного пространства заключается в том, что оно содержит все необходимые и достаточные для управления сведения, а также взаимосвязи между их элементами. Внедрение и практическая эксплуатация системы, основанной на изложенных принципах, позволили значительно повысить эффективность работы на производственном предприятии, выпускающем технологическое оборудование.

Summary. Currently, shipbuilding and ship repair enterprises in the process of design and technological preparation and in the performance of works widely use digital technologies for effective planning and management. The heterogeneity and different functionality of information systems have led to problems in the creation of integrated management systems for enterprises and corporations. In the article presented, the authors propose an approach to solving the existing problems. The authors developed the concept of building a single information space based



on the functional model of the enterprise. Design and technological information about products and information about the current state of the company's production resources are the basic elements of a single information space. The originality and effectiveness of the proposed structure of the information space is that it contains all the necessary and sufficient information for management, as well as the interrelations between its elements. At the manufacturing plant, which produces equipment for fish processing on ships, we have implemented an integrated system built on the principles described. At the same time, a significant increase in the efficiency of work in the enterprise.

Ключевые слова: цифровые технологии, объединённое информационное пространство, автоматизация проектирования, автоматизация управления, интегрированные системы, машиностроительное производство.

Key words: digital technologies, integrated information space, design automation, automation management, integrated systems, shipbuilding.

УДК 004.94:004.057:004.032.34:65.014.1

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по государственному контракту № 02.G25.31.0173.

Введение

Характерной чертой многих современных машиностроительных предприятий является мелкосерийный характер производства [1; 8].

Повторяемость выпуска изделий или заказов на этих предприятиях зачастую нерегулярна, а иногда отсутствует полностью. С учётом достаточно большого количества разноплановых технологий, значительного разнообразия поставщиков материалов и комплектующих и необходимости увязки между собой всех процессов предприятия с точки зрения управления этот вид производства можно отнести к сложным системам. При этом одной из основных проблем автоматизации управления ресурсами на единичных и мелкосерийных предприятиях с дискретизацией производственных процессов является сложность и реальная вычислимость алгоритмов при наличии множества разноплановых факторов [2; 3; 9].

Для повышения эффективности машиностроительных предприятий необходимо создание действенных систем управления, учитывающих особенности этой отрасли, опыт отечественных разработок, а также использующих российские и зарубежные прогрессивные разработки.

Современное состояние теории и практики автоматизации управления ресурсами сложных производственных систем характеризуется рядом проблем, связанных с дезинтеграцией организационного взаимодействия подразделений и служб; чрезвычайной сложностью, а зачастую и невозможностью стыковки CAD-, PLM- и ERP-систем; отсутствием формальных методов для автоматизации подготовки технологических процессов (бизнес-процессов); корректного производственного планирования при изменении выпускаемой продукции [4].

Проблемы интеграции цифровых технологий

Первая проблема заключается в дезинтеграции организационного взаимодействия производственных подразделений и служб предприятия, что вызывает разобщённость локальных целевых функций и, как следствие, несогласованность в управляющих воздействиях внутри подсистем.

В практической деятельности предприятий эта проблема проявляется в том, что в подавляющем большинстве недостаточно чёткая информированность об оперативных целях и задачах в конечном итоге приводит к отклонениям в производственном процессе. Для преодоления этой проблемы необходимо отыскать и сформулировать принципы и правила информационного взаимодействия между элементами системы с оперативным изменением локальных целевых функций таким образом, чтобы это обеспечивало достижение глобальной цели.

Вторая проблема касается разобщённости локальных информационных пространств представления данных в системах автоматизации конструирования (CAD), системах автоматизации проектирования технологических процессов (САПР ТП), системах управления конструкторско-технологическими образами на протяжении всего их жизненного цикла (PLM), а также в системах

управления ресурсами предприятия (ERP). На современном этапе развития эта проблема порождает сложность, а зачастую и невозможность компоновки сквозной интегрированной системы управления потоками информации. Для решения этой проблемы представляется крайне необходимым иметь единое информационное пространство, обобщающее в систематизированном виде необходимую и достаточную информацию для обеспечения полноценного функционирования перечисленных систем автоматизации.

Третья проблема заключается в формализации синтеза единичных технологических процессов для автоматизации подготовки технологической информации в системе управления, что позволит значительно сократить количество ошибок и повысить оперативность технологической подготовки. Для решения указанной проблемы требуется понимание и выявление принципов и формальных методов синтеза и выбора приемлемых технологических решений. Аналогами отечественных систем автоматизации проектирования технологических процессов (САПР ТП) в различных странах мира являются системы CAPP (Computer-Aided Process Planning), проектирование в которых в основном осуществляется на основе использования уже существующих и описанных технологий.

Четвёртая проблема заключается в корректности и адекватности моделей производственного планирования при выпуске часто сменяемой продукции на предприятиях мелкосерийного и единичного характера с учётом реального ресурсного обеспечения. Предлагаемые в мире многочисленные методы и алгоритмы, учитывая NP-сложность задач планирования, обеспечивают решение в условиях наличия ряда ограничений, что не соответствует реальным производственным условиям.

Многие авторы сходятся во мнении, что основная проблема заключается не столько в NP-сложности процесса формирования графика загрузки оборудования, сколько в адекватности используемых моделей организационным и функциональным структурам предприятий.

Концепция единого информационного пространства управления

Решение проблемы автоматизации управления проектированием и производством машиностроительных изделий необходимо начинать с исследования предприятия и построения функциональной схемы его деятельности.

В предлагаемом подходе функциональная схема включает функции, выполняемые подразделениями предприятия, потоки (материальный, финансовый, информационный), а также описывает преобразование этих потоков в результате выполнения функций.

Модель производства представляет собой базовую производственную площадку в виде конечного множества рабочих мест R , на которых в каждый момент времени выполняется некоторая совокупность дискретных детали-операций в соответствии с заданной программой (производственным планом).

Базовую производственную площадку можно представить в виде конечного множества рабочих мест R , элементами которого являются r_1, r_2, \dots, r_n .

Каждый элемент этого множества может быть представлен в виде нескольких проекций в векторном пространстве его свойств. Например, любое рабочее место r_i может иметь: собственное обозначение – r_i^N ; площадь для его размещения – r_i^S ; типоразмер оборудования – r_i^T ; модель оборудования – r_i^M и т. д. Таким образом, полную информацию об элементе r_i представляет собой объединение всех проекций этого элемента $r_i = r_i^N \cup r_i^S \cup r_i^T \cup r_i^M$.

Тогда множество R представляется объединением конечных множеств, имеющих одинаковую мощность:

$$R = R^N \cup R^S \cup R^T \cup R^M, \text{ где } R^N := \{r_1^N, r_2^N, \dots, r_n^N\}; \\ R^S := \{r_1^S, r_2^S, \dots, r_n^S\};$$

$$R^T := \{r_1^T, r_2^T, \dots, r_n^T\};$$

$$R^M := \{r_1^M, r_2^M, \dots, r_n^M\}.$$

Особую роль при планировании играют транспортные пути между рабочими местами, наличие которых удобно представлять связями между элементами множества размещения на площадке R^S , а величины (расстояния) приписанными к ним весами.

Обозначим W^R множество транспортных связей между рабочими местами R^S . Тогда совокупность рабочих мест и транспортных связей представляется в виде графа, вершинами которого являются элементы множества R^S , а рёбрами (дугами) – элементы множества $W^R := \{w_1^R, w_2^R, \dots, w_m^R\}$. Мощность множества W^R определяется как число рёбер полного графа с

указанным количеством вершин [5; 6] $|W^R| = \frac{n \cdot (n-1)}{2}$, где n – количество элементов множества R^S .

Кроме множества рабочих мест и технологического оборудования, требуются вполне определённые инструмент, оснастка и средства измерения, при отсутствии которых выполнение операций невозможно.

Полный информационный образ производственной площадки может быть представлен в виде вышеперечисленных множеств, дополненных информацией о различном оснащении в виде множества приспособлений E^A (*adjustment*), инструментов E^T (*tool*), мерительных средств E^M (*measuring equipment*) и вспомогательных сырья и материалов E^P (*primary products and auxiliary materials*).

Все перечисленные множества не имеют ни одного общего элемента. Например, любой элемент e_i^A , принадлежащий множеству E^A , не принадлежит ни одному из множеств E^T, E^M или E^P , то есть $\forall e_i^A \in E^A, i = 1, \dots, m, e_i^A \notin E^T, e_i^A \notin E^M, e_i^A \notin E^P$.

В отличие от материалов и комплектующих оснастка, инструменты, мерительные средства и станки не являются расходным ресурсом, хотя и не являются неисчерпаемым. Тем самым для обеспечения корректного планирования и управления производственным процессом необходимо иметь информацию о возможности использования на конкретном рабочем месте r_i для конкретной модели оборудования r_i^M , подходящего набора инструментов e_j^T и приспособлений e_k^A . При этом на практике имеют место сочетания, в которых инструмент e_j^T устанавливается непосредственно на приспособление e_k^A , которое, в свою очередь, стыкуется с технологическим оборудованием r_i^M .

На рис. 1 показан пример связей между элементами множества R^M с элементами множеств E^A и E^T .

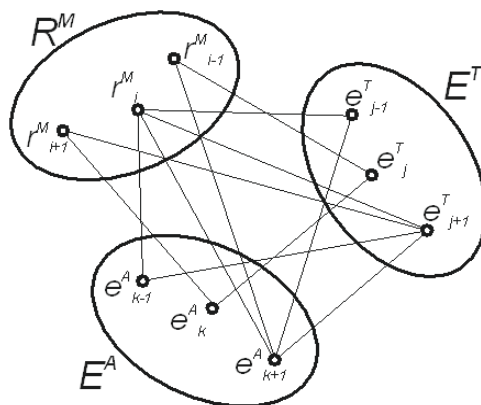


Рис. 1. Отношения на множествах R^M, E^A и E^T

Мощность множества связей W^{RT} между множествами оборудования R^M и инструмента E^T определится как декартово (прямое) произведение элементов этих непересекающихся множеств:

$$W^{RT} = R^M \times E^T = \{(r, e^T) \mid r \in R^M, e^T \in E^T\}.$$

Аналогично определяются мощность множества W^{RA} отношений между множествами R^M и E^A , а также множества W^{AT} между E^A и E^T .

Множество R является семейством множеств R^j . Тогда в соответствии с аксиомой выбора [7] для любого семейства R непустых множеств существует функция которая сопоставляет один из элементов r_i^j множества R^j каждому множеству семейства [10]. Для данного случая функция выбора представляется в следующем виде:

$$\forall R[\emptyset \notin R \Rightarrow \exists f : R \rightarrow \cup R \forall A \in R (f(A) \in A)].$$

Согласно этой аксиоме можно произвольно выбирать из каждого множества один из элементов, совокупность которых, в свою очередь, позволяет сформировать элементы соответствующего семейства.

Таким образом, можно сформировать информационную модель в виде «виртуального отпечатка» производственной площадки, которая является базисом для реализации производственных функций. Несмотря на то что наличие такого базиса является необходимым для существования производства, требуется ещё выполнение условия достаточности [1; 3; 4].

В данной работе предлагается условие необходимости обеспечить базисом (центром) пространства управления с двумя измерениями P^2 . Одним измерением является перечислимое множество наименований рабочих мест R^M , другим – время (t).

Для обеспечения достаточности базис пространства управления может быть дополнен любым количеством двумерных подпространств со связанной с базисом координатой времени, например, пространство инструментов, приспособлений и мерительных средств.

Система автоматизации управления на основе единого информационного пространства

Единое информационное пространство не определяет какие-либо конкретные решения, но отображает среду существования общего количества различных вариантов решений и позволяет строить модели управления.

Авторы предлагают формировать систему управления на основе ядра управления, построенного в едином информационном пространстве. Ядро управления (*core of management*) можно представить в виде постоянно изменяющегося во времени набора функций преобразования потоков, размещённых в центре пространства управления P^2 с двумя измерениями. При этом технологическая операция является элементарной функцией, описывающей связи между значениями параметров на координатных осях и регламентирующей эти значения.

Таким образом, формирование управляющей программы может выполняться в двумерном пространстве времени-рабочих мест без учёта изменений остальных координат (инструмент, материалы, и т. д.), как показано на рис. 2.

Пространство управления, изображённое на рис. 2, определяется двумя координатами – осью рабочих мест R^M и осью времени t . Прямоугольники отображают размещённые на рабочих местах функции преобразования материальных потоков детали-сборочных единиц во временных интервалах.

При каждой процедуре планирования (добавление или удаление заказов) ядро управления из состояния C_k переходит в состояние C_{k+1} .

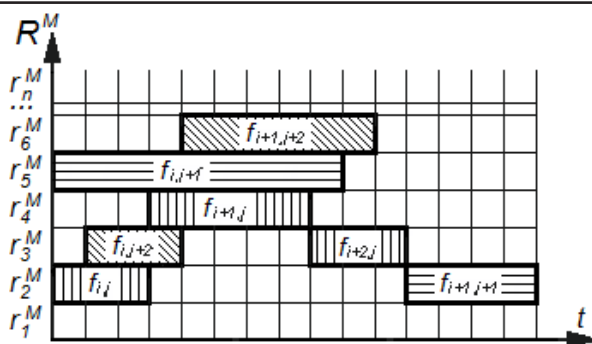


Рис. 2. Отображение ядра управления в базисе пространства с двумя измерениями P^2

Далее, пространство управления дополняется двухмерными подпространствами инструментов, приспособлений и мерительных средств со связанной с базисом координатой времени. Тогда проекции функций f_{ij} на соответствующее подпространство из числа E^A, E^T, E^M или E^P формируют потребности в соответствующем оснащении. На рис. 3 показан пример визуализации проекции функций ядра управления на подпространство E^T .

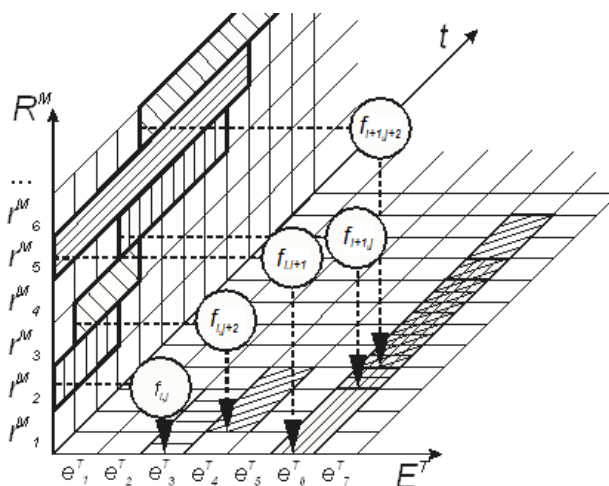


Рис. 3. Проекция функций ядра управления на подпространство E^T

Такой подход предполагает формирование программы управления в виде графика загрузки рабочих мест при следующих условиях: координата времени бесконечна, координата рабочих мест счётна, конечна и ограничена имеющимся на предприятии оборудованием; координаты инструментов, материалов, оснастки являются счётными, конечными, но считаются неограниченными. В данном случае под неограниченностью понимается то, что на практике потребное количество ресурса K^P всегда меньше либо равно предельно допустимому значению $[K^P]$, то есть $K^P \leq [K^P]$.

Можно сказать, что ядро управления представляет собой насыщение пространства информационными объектами в виде конечного множества конкретных функций, связывающих (сопоставляющих) значения координатного пространства.

Исходя из описанных условий, сформированное ядро управления позволяет определить объём необходимых ресурсов для выполнения производственных заданий, а также моменты времени использования ресурсов. Для пополняемых ресурсов (материалов, инструментов и т. д.)

такая программа однозначно определяет формирование требований (графиков) приобретения этих ресурсов в нужных объемах и в необходимые сроки.

Система управления предприятием, построенная на основе предлагаемого ядра управления, сформированного в едином информационном пространстве, в любой момент позволяет получить информацию о состоянии объекта управления. Составленные на основе единой согласованной информации планы подразделений имеют непротиворечивый характер и нацелены на претворение единой стратегии предприятия.

Предложенная формализация построения ядра системы управления позволяет решать существующие проблемы интеграции информационных систем на платформе единого информационного пространства.

Заключение

Рассмотренные подходы реализованы при создании интегрированной системы автоматизированного управления ресурсами для предприятия АО «Дальрыбтехцентр», выпускающего оборудование для рыбоперерабатывающих судов. Автоматизированная система конструкторско-технологической и планово-производственной подготовки разработана на отечественной платформе «1С: УПП». В результате внедрения этой системы на предприятии основательно реконструирована организационная структура, обеспечивающая четкую схему «прохождения» заказов по службам.

Практика внедрения и эксплуатации рассматриваемой системы показала, что наиболее ощутимый эффект наглядно проявился через полгода, когда накопилась некоторая «критическая масса» информации как конструкторско-технологической, так и плановой. С использованием автоматизированной системы процедура планирования стала выполняться в десятки раз быстрее. Например, для формирования приблизительного плана с перечнем необходимых материалов для среднестатистического изделия, даже периодически выпускаемого, опытный специалист по подготовке производства тратил три рабочих дня (24 часа), а с помощью системы эта процедура занимает около одного часа.

Общий эффект от внедрения выразился в сокращении затрат на материалы на 15–25 %, снижении трудоёмкости в 2–2,5 раза при одновременном сокращении количества основных рабочих и повышении качества выпускаемой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лелюхин, В. Е. Интегрированная система подготовки производства судоремонтного предприятия / В. Е. Лелюхин, О. В. Колесникова // Судостроение. – 2015. – № 2 – с. 52-54.
2. Лелюхин, В. Е. Алгоритм планирования дискретного машиностроительного производства «Опадающие листья» / В. Е. Лелюхин, О. В. Колесникова // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 1. – С. 15-19.
3. Лелюхин, В. Е. Метод формирования плана многономенклатурного мелкосерийного и единичного машиностроительного производства / В. Е. Лелюхин, О. В. Колесникова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1(25). – С. 57-65.
4. Лелюхин, В. Е. Разработка модели управления предприятием на основе функционального подхода / В. Е. Лелюхин, О. В. Колесникова // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 9-2. – с. 337-341;
5. Кирсанов, М. Н. Графы в Maple. Задачи, алгоритмы, программы / М. Н. Кирсанов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 168 с.
6. Редькин, Н. П. Дискретная математика: курс лекций для студентов-механиков / Н. П. Редькин. – СПб: Издательство «Лань», 2003. – 96 с.
7. Математическая энциклопедия. В 5 т. Т. 1. / под ред. И. М. Виноградова. – М.: Советская энциклопедия, 1977. – 576 с.
8. Spicknall, M. H. Dimensional Engineering Process for Shipbuilding / M. H. Spicknall, R. Kumar // Journal of Ship Production. – 2001. – Vol. 18. – № 2. – P. 105-115.
9. Halevi, G. Industrial Management – Control and Profit / G. Halevi // Lecture Notes in Management and Industrial Engineering 1, Springer International Publishing Switzerland. – 2014. – 284 p.
10. Badiou, A. Being and Event / A. Badiou. – New York: Continuum, 2007. – 528 p.

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА
MATHEMATICS AND MECHANICS

Ковтаныук Л. В., Севастьянов Г. М., Штука В. И.
L. V. Kovtanyuk, G. M. Sevastyanov, V. I. Shtuka

**ОДНОМЕРНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В УСЛОВИЯХ НАГРУЗКИ,
ВЫЗЫВАЮЩЕЙ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ**

**ONE-DIMENSIONAL CYLINDRICAL SHOCK WAVES UNDER CONDITIONS
OF STRESS CAUSING A VISCOPLASTIC FLOW**

Ковтаныук Лариса Валентиновна – доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией механики необратимого деформирования Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток); 690041, Приморский край, г. Владивосток, ул. Радио, 5. E-mail: lk@iacp.dvo.ru.

Mrs. Larisa V. Kovtanyuk – Dr. Sci. Phys. & Math., Head of Laboratory of irreversible deformation mechanics, Institute of Automation and Controlled Processes, FEB RAS (Russia, Vladivostok); 690041, Primorsky territory, Vladivostok, 5 Radio str. E-mail: lk@iacp.dvo.ru.

Севастьянов Георгий Мамиевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1. E-mail: akela.86@mail.ru.

Mr. Georgii M. Sevastyanov – Ph. D in Phys. & Math., Senior Researcher, Institute of Machine Engineering and Metallurgy, FEB RAS (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists str. E-mail: akela.86@mail.ru.

Штука Виктор Игоревич – инженер-математик лаборатории механики необратимого деформирования Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток); младший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: onslice@mail.ru.

Mr. Victor I. Shtuka – applied mathematician, Laboratory of irreversible deformation mechanics, Institute of Automation and Controlled Processes, FEB RAS (Russia, Vladivostok); Junior Researcher in Institute of Machine Engineering and Metallurgy FEB RAS (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: onslice@mail.ru.

Аннотация. В рамках теории больших деформаций рассмотрены особенности моделирования отклика несжимаемого упруговязкопластического цилиндрического слоя с предварительными антиплоскими деформациями на существенно нестационарные граничные воздействия. Постановка задачи допускает существование и распространение расходящихся ударных волн ненулевой кривизны, поэтому представление решения за движущимися поверхностями сильных разрывов происходит при помощи нелинейного лучевого метода. Предварительное состояние слоя, определенное решением статической задачи, выбирается таким, что момент ударного нагружения совпадает с началом пластического течения на внутренней поверхности слоя. В этом случае граница области течения является ударной волной нагрузки, а следующая ударная волна круговой поляризации распространится по области, содержащей необратимые деформации, что позволило получить аналитические выражения для приближённого решения.

Summary. In the framework of the theory of finite deformations, the features of modeling the response of an incompressible elastoviscoplastic cylindrical layer with preliminary antiplane deformations to essentially nonstationary boundary effects are considered. The formulation of the problem admits the existence and propagation of divergent shock waves with nonzero curvature, therefore, the representation of the solution behind the moving surfaces of strong discontinuities occurs by means of the nonlinear ray method. The preliminary state of the layer, determined by the solution of the static problem, is chosen in such a way that the shock loading moment coincide with the onset of the plastic flow on the inner surface of the layer. In this case, the boundary of the flow region is the shock wave of the load, and the next shock wave of circular polarization will propagate along the region containing irreversible deformations, which allows obtaining analytical expressions for an approximate solution.

Ключевые слова: упруговязкопластичность, динамика, большие деформации, ударные волны, лучевой метод, численное моделирование.

Key words: elastoviscoplasticity, dynamics, finite deformations, shock waves, ray method, numerical simulation.

УДК: 539.3

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № № 18-01-00038, 17-301-50007 «мол_нр».

Введение

Высокоскоростные технологические процессы штамповки,ковки, пробивания отверстий связаны со значительными величинами прикладываемых нагрузок. Поэтому обработка материалов давлением и расчётное прогнозирование геометрии получаемых изделий является актуальной задачей, особенно когда нельзя считать необратимые деформации малыми [0]. Модель Прандтля – Рейса оказывается неприемлемой для этих целей, а учёт вязкости – необходимым, поскольку существенным оказывается влияние скорости деформирования и отклик материала на такие воздействия. Учёт упругих эффектов продиктован потребностями технологической практики, поскольку обратимые составляющие деформаций оказывают существенное влияние на уровень и распределение остаточных напряжений [9; 11]. Моделировать и прогнозировать подобные явления необходимо в одной из теорий течения. Здесь будем использовать теорию больших деформаций [0], в которой разделение полных деформаций на составляющие (обратимые и необратимые деформации) является следствием дифференциальных определений, а скорости необратимых деформаций выступают в качестве источников в соответствующих уравнениях переноса. Отметим работы [2; 13], выполненные ранее в рамках линейной теории упруговязкопластичности.

Поскольку рассматриваются существенно нестационарные процессы, связанные с ударным воздействием, необходимым оказывается использование специального математического аппарата для работы с разрывными функциями и соответствующих методик решения систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Предложенный ещё в [0] и [0] (независимо друг от друга) метод лучевых рядов позволяет представлять неизвестные функции за поверхностями разрывов в виде рядов, устроенных по типу ряда Тейлора, а дополнительное разложение составляющих разрывов на ударных волнах [0] расширило данную методику и способствовало решению задач с ударными волнами, которые ранее в силу принципиальной нелинейности данного явления при помощи обыкновенного лучевого метода решать не удавалось. Описание особенностей лучевого метода содержится в подробном обзоре [0].

Определяющие соотношения и ударные волны

Модель больших деформаций [0] для изотропного несжимаемого упруговязкопластического тела представлена в декартовой системе координат x_1, x_2, x_3 соотношениями

$$\begin{aligned}\alpha_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} - u_{k,i}u_{k,j}) = e_{ij} + p_{ij} - \frac{1}{2}e_{ik}e_{kj} - e_{ik}p_{kj} - p_{ik}e_{kj} + e_{ik}p_{km}e_{mj}, \\ \frac{De_{ij}}{Dt} &= \varepsilon_{ij} - \gamma_{ij} - \frac{1}{2}(\varepsilon_{ik} - \gamma_{ik} + z_{ik})e_{kj} + \frac{1}{2}e_{ik}(\gamma_{kj} - \varepsilon_{kj} - z_{kj}), \\ \frac{Dp_{ij}}{Dt} &= \gamma_{ij} - p_{ik}\gamma_{kj} - \gamma_{ik}p_{kj}, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}), \quad v_i = \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_{i,j}v_j, \quad u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j},\end{aligned}\quad (1)$$

где α_{ij} , e_{ij} , p_{ij} – компоненты тензоров полных деформаций Альманси обратимых и необратимых деформаций соответственно; ε_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; u_i , v_i – компоненты векторов перемещений и скоростей. Индексом после запятой обозначена производная по соот-

ветствующей пространственной координате. Определение объективной производной в уравнениях переноса (1) записано для компонент n_{ij} произвольного тензора

$$\frac{Dn_{ij}}{Dt} = \frac{dn_{ij}}{dt} - r_{ik}n_{kj} + n_{ik}r_{kj}, \quad r_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} - v_{j,i}) + z_{ij}, \quad z_{ij} = A^{-1} \left(B^2 (\varepsilon_{ik}e_{kj} - e_{ik}\varepsilon_{kj}) + \right. \\ \left. + B(\varepsilon_{ik}e_{kl}e_{lj} - e_{ik}e_{kl}\varepsilon_{lj}) + e_{ik}\varepsilon_{kl}e_{ln}e_{nj} - e_{ik}e_{kl}\varepsilon_{ln}e_{nj} \right), \quad A = 8 - 8E_1 + 3E_1^2 - E_2 - (E_1^3 - E_3)/3, \\ B = 2 - E_1,$$

где $E_1 = s_{kk}$, $E_2 = s_{kj}s_{ji}$, $E_3 = s_{kj}s_{jk}s_{ki}$ – линейный, квадратичный и кубический инварианты тензора упругих деформаций ($s_{ij} = e_{ij} - e_{ik}e_{kj}/2$).

Компоненты тензора источника необратимых деформаций в (1) отождествляются с тензором скоростей пластических деформаций ($\gamma_{ij} = \varepsilon_{ij}^p$), следовательно, реологическими эффектами при упругом деформировании и при разгрузке пренебрегаем. Принимается гипотеза независимости термодинамических потенциалов (внутренняя энергия, свободная энергия) от необратимых деформаций p_{ij} . В этом случае следствием закона сохранения энергии оказывается обобщение формулы Мурнагана для несжимаемой среды и уравнение баланса энтропии s :

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \frac{\partial W}{\partial e_{ik}}(\delta_{kj} - e_{kj}) \quad \text{при } p_{ij} \neq 0, \\ \sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \frac{\partial W}{\partial \alpha_{ik}}(\delta_{kj} - 2\alpha_{kj}) \quad \text{при } p_{ij} = 0, \quad (2) \\ \rho T \frac{ds}{dt} + q_{k,k} = \sigma_{ij}\varepsilon_{ij}^p,$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений Коши – Эйлера; p – функция добавочного всестороннего давления; $\rho = \text{const}$ – плотность среды.

Для определения состояния среды при её пластическом течении выберем критерий вязкопластичности Губера – Мизеса (из-за гладкости функции нагружения, а также возможности явного выражения зависимости девiatora тензора напряжений и компонент тензора скоростей необратимых деформаций):

$$f(\tau_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = (\tau_{ij} - \eta\varepsilon_{ij}^p)(\tau_{ji} - \eta\varepsilon_{ji}^p) - 8k^2/3 = 0, \quad (3) \\ \tau_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}, \quad \varepsilon_{ij}^p = \psi \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad \psi > 0,$$

где η, k – коэффициент вязкости и предел текучести. Ассоциированный закон течения (3) делает возможной явную запись следующей зависимости, которую будем использовать далее в работе:

$$\varepsilon_{ij}^p = \left(1 - \frac{\sqrt{8}k}{\sqrt{3}\tau_{kl}\tau_{lk}} \right) \frac{\tau_{ij}}{\eta}. \quad (4)$$

Данная формула при различных значениях коэффициента вязкости позволяет осуществить переход либо к упругопластической среде, либо к упругой за счёт устремления η к нулю или к бесконечности соответственно. При этом очевидно, что возрастание значений недиагональных компонент тензора напряжений приведёт к возрастанию и скоростей необратимых деформаций,

что повлияет на необратимые деформации и в целом снизит уровень напряжений. Такое поведение характерно при наличии вязкости рассматриваемой среды.

Уравнение движения имеет вид

$$\sigma_{ij,j} = \rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_{i,j} v_j \right). \quad (5)$$

Потенциал изотропной несжимаемой среды W (плотность распределения внутренней энергии) представлен разложением в ряд Тейлора относительно свободного состояния по инвариантам тензора деформаций

$$W(A_1, A_2) = -2\mu A_1 + b A_1^2 - \mu A_2 - a A_1^3 - (\mu - b) A_1 A_2 + \dots, \quad (6)$$

$$A_1 = \alpha_{kk}, A_2 = \alpha_{ik} \alpha_{ki},$$

где μ – модуль сдвига; a, b – модули упругости третьего порядка. Сокращение числа постоянных материала вызвано характером дальнейшего винтового деформирования, заставляющего их быть связанными между собой [0]. Компоненты вектора перемещений согласно заданной кинематике в цилиндрической системе координат r, φ, z будут иметь вид

$$u_r = r(1 - \cos \psi(r, t)), \quad u_\varphi = r \sin \psi(r, t), \quad u_z = u(r, t), \quad (7)$$

где функция $\psi(r, t)$ – крутка (изменение угловой меры точки относительно оси z), а функция $u(r, t)$ – смещение (изменение положения точки вдоль оси z). Компоненты тензора напряжений Коши – Эйлера (2), а соответственно и уравнение движения (5) могут быть записаны как в деформациях, так и в системе функций $\{p, \psi, u\}$. В этом отношении любое из данных определений будет эквивалентным.

Описание динамических условий совместности и следствия из них для несжимаемого цилиндрического слоя с предварительными деформациями показаны в работах [0], [0] и [0]. На основании сравнительного анализа проведённых исследований было определено, что скорости поверхностей сильных разрывов в упруговязкопластической среде с точностью до малых старшего порядка совпадают со скоростями ударных волн в упругой среде, поэтому в несжимаемой упруговязкопластической среде с предварительными антиплоскими деформациями ($p_{ij} = 0, \varepsilon_{ij}^p = 0, e_{r\varphi} = 0, e_{rz} \neq 0$) движутся две поверхности разрывов деформаций (см. рис. 1): первая – волна нагрузки Σ_1 , вторая – волна круговой поляризации Σ_2 со скоростями

$$G_1 = c \left(1 + \chi e_{rz}^4 \left(5 + 10 c^{-1} \kappa_1 / e_{rz} + 10 (c^{-1} \kappa_1 / e_{rz})^2 + 5 (c^{-1} \kappa_1 / e_{rz})^3 + (c^{-1} \kappa_1 / e_{rz})^4 \right) / 2 + \dots \right),$$

$$G_2 = c \left(1 + \chi e_{rz}^4 \left(1 + 4 c^{-1} \kappa_1 / e_{rz} + 6 (c^{-1} \kappa_1 / e_{rz})^2 + 4 (c^{-1} \kappa_1 / e_{rz})^3 + (c^{-1} \kappa_1 / e_{rz})^4 \right) / 2 + \dots \right), \quad (8)$$

$$\chi = 3\mu^{-1}(a - b + \mu) / 4, \quad c = \sqrt{\mu / \rho}.$$

Следствием динамического условия совместности $[\sigma_{rr}] = 0, [\sigma_{r\varphi}] = -\rho G[v_\varphi], [\sigma_{rz}] = -\rho G[v_z]$ являются следующие свойства данных поверхностей разрывов: первая волна увеличивает предварительный сдвиг, а вторая изменяет его направленность.

Ещё одним свойством волн, распространяющихся в несжимаемом упруговязкопластическом цилиндрическом слое, является непрерывность необратимых деформаций ($[p_{ij}] = 0$) и взаимосвязь скачков скоростей с разрывами компонент обратимых деформаций $[e_{r\varphi}][v_z] - [e_{rz}][v_\varphi] = 0$,

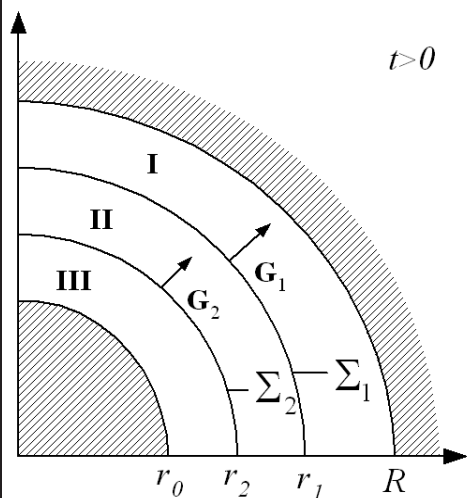


Рис. 1. Схематическое изображение распространения ударных волн

где квадратными скобками обозначен скачок функции на поверхности разрыва $[f] = f^+ - f^-$ (индексы «+» и «-» соответствуют значениям функции «перед» и «за» поверхностью разрыва соответственно).

Постановка задачи и лучевой метод

Полагаем, что поведение упруговязкопластического материала определено соотношениями (1-3), (5), (6) и он заполняет собой пространство между двумя жёсткими цилиндрическими поверхностями диаметрами $r = r_0$ и $r = R$ ($R > r_0$). На границах слоя выполняются условия прилипания. До момента начала нагружения ($t \leq 0$) *предварительные антиплоские деформации* определяются величиной $u_0 = u(r_0, 0)$. При последующем воздействии ($t > 0$) *краевые условия имеют вид*

$$\begin{aligned} u(r_0, t) = u_0, \quad \psi(R, t) = 0, \\ \psi(r_0, t) = \psi_1 t + \psi_2 t^2, \quad u(R, t) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

и определяют скорость и ускорение крутки, инициируют распространение двух расходящихся от внутренней поверхности

слоя ударных волн. Предварительные деформации $u(r)$ полагаются такими, что краевые условия (7) обеспечивают моментальный переход слоя в состояние текучести за волной нагрузки.

Если условие пластичности (3) будет выполнено в некоторый отличный от начального момент времени $t^* > 0$, то в расчёты необходимо будет включить движущуюся границу течения (поверхность слабого разрыва), определение которой не является тривиальной задачей. Поэтому с целью упрощения и возможности получения аналитических выражений считаем, что предварительное состояние слоя обеспечивает непосредственное выполнение условия текучести (3) в момент начала скручивающего воздействия. Этого можно добиться при решении соответствующей задачи статики.

В соответствии с идеей лучевого метода запишем искомые функции за Σ_1 и за Σ_2 (области II и III см. на рис. 1) в виде лучевых рядов:

$$\begin{aligned} u^-(r, t) = u(r, t) - \sum_{j=1}^{\infty} \omega_j \frac{(t-t_2)^j}{j!}, \quad u(r, t) = u(r) - \sum_{j=1}^{\infty} \kappa_j \frac{(t-t_1)^j}{j!}, \quad \kappa_j = \left[\frac{\partial^j u}{\partial t^j} \right]_{\Sigma_1}, \quad \omega_j = \left[\frac{\partial^j u}{\partial t^j} \right]_{\Sigma_2}, \\ \psi^-(r, t) = - \sum_{j=1}^{\infty} \eta_j \frac{(t-t_2)^j}{j!}, \quad \eta_j = \left[\frac{\partial^j \psi}{\partial t^j} \right]_{\Sigma_2}, \quad t_\alpha = \int_0^r G_\alpha^{-1}(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (8)$$

На Σ_1 и Σ_2 система уравнений, представляющая собой уравнение движения (5), записанное в переменных (7) с использованием понятия дельта-производной по времени [0], выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{\delta \kappa_1}{\delta t} &= -\kappa_1 \left(\frac{1}{2} \frac{c}{r} + \chi \frac{5}{8} \frac{e_{rz}^3}{c} (\kappa_2 - c^2 e_{rz,r}) \right) + \frac{1}{2} \kappa_2 + \frac{3}{2} c [p_{rz,t}] + \dots, \\
\frac{\delta \eta_1}{\delta t} &= -\eta_1 \left(\frac{3}{2} \frac{c}{r} + 2\chi \frac{e_{rz}^3}{c} (\eta_2 - c^2 e_{rz,r}) + \frac{1}{2} \frac{\tau_1}{c} \frac{\delta \kappa_1}{\delta t} \right) + \\
&+ \chi e_{rz}^2 \kappa_1 \left(3\eta_1 \left(\frac{e_{rz}}{r} + 2 \left(\frac{\kappa_2}{c^2} - e_{rz,r} \right) \right) + 2 \frac{\eta_2 e_{rz}}{c} \right) + \frac{1}{2} \frac{c}{r} [p_{r\varphi,t}] + \dots, \\
\omega_2 &= -\frac{\eta_1 \eta_2}{c e_{rz}} \left(1 - \frac{4}{5} \frac{\kappa_1}{c e_{rz}} (1 - \chi e_{rz}^4) \right) + \dots, \quad \frac{\delta \ln G_1}{\delta t} = -\frac{\tau_1}{c} \frac{\delta [v_z]}{\delta t}.
\end{aligned} \tag{9}$$

Величины скачков скоростей необратимых деформаций в (8) определяются из уравнений переноса (1) для соответствующих компонент

$$\begin{aligned}
p_{r\varphi,t} &= \varepsilon_{r\varphi}^p - (p_{rr} + p_{\varphi\varphi})(\varepsilon_{r\varphi} - \varepsilon_{r\varphi}^p) - p_{\varphi z}(\varepsilon_{rz} + \varepsilon_{rz}^p) - \dots, \\
p_{rz,t} &= \varepsilon_{rz}^p - (p_{rr} + p_{zz})(\varepsilon_{rz} - \varepsilon_{rz}^p) - p_{\varphi z}(\varepsilon_{r\varphi} + \varepsilon_{r\varphi}^p) - \dots
\end{aligned} \tag{10}$$

В отношении величин $p_{r\varphi}$ и p_{rz} явно наблюдается аналогия с компонентами вектора перемещений u_i , поскольку они также являются непрерывными ($[u_i] = 0$). Представление их за ударными волнами осуществляется при помощи рядов вида

$$p_{rj}^- = p_{rj} - [p_{rj,t}]_{\Sigma_1} (t-t_1) - [p_{rj,tt}]_{\Sigma_1} (t-t_1)^2 / 2 - \dots - [p_{rj,t}]_{\Sigma_2} (t-t_2) - [p_{rj,tt}]_{\Sigma_2} (t-t_2)^2 / 2.$$

Разрешая системы (7) с учётом краевых условий (9), необратимых деформаций (4), уравнений переноса (10), записанных на ударных волнах, а также дополнительных разложений разрывов

$$\begin{aligned}
\kappa_1 &= (\kappa_{10} + \kappa_{11} t_1)(t-t_1) + \dots, & \kappa_2 &= \kappa_{20}(t-t_1)^2 + \dots, \\
\eta_1 &= (\eta_{10} + \eta_{11} t_2)(t-t_2) + \dots, & \eta_2 &= \eta_{20}(t-t_2)^2 + \dots,
\end{aligned}$$

получим приближённое решение задачи:

$$\kappa_{10} = -\frac{1}{2} \frac{r^2 \Psi_1^2}{c e_{rz}} + \dots, \quad \kappa_{20} = -\frac{1}{2} \frac{r^2 \Psi_1 \Psi_2}{c e_{rz}} + \dots, \quad \eta_{10} = -\Psi_1, \quad \eta_{20} = -\Psi_2.$$

Для времён достижения ударными волнами определённой точки пространства в (8) справедливыми оказываются выражения

$$\begin{aligned}
t_1(r) &= \frac{r-r_0}{c(1+\chi(5e_{rz}^4+10e_{rz}^3c^{-1}\kappa_{10}+10e_{rz}^2c^{-2}\kappa_{10}^2+5e_{rz}c^{-3}\kappa_{10}^3+c^{-4}\kappa_{10}^4))/2)} - \\
&- \frac{\chi\kappa_{11}(10e_{rz}^3c^{-1}+20e_{rz}^2c^{-2}\kappa_{10}+15e_{rz}c^{-3}\kappa_{10}^2+4c^{-4}\kappa_{10}^3)(r-r_0)^2}{4c^2(1+\chi(5e_{rz}^4+10e_{rz}^3c^{-1}\kappa_{10}+10e_{rz}^2c^{-2}\kappa_{10}^2+5e_{rz}c^{-3}\kappa_{10}^3+c^{-4}\kappa_{10}^4))/2)^3} + \dots, \\
t_2(r) &= \frac{r-r_0}{c(1+\chi(e_{rz}^4+4e_{rz}^3c^{-1}\kappa_{10}+6e_{rz}^2c^{-2}\kappa_{10}^2+4e_{rz}c^{-3}\kappa_{10}^3+c^{-4}\kappa_{10}^4))/2)} - \\
&- \frac{\chi\kappa_{11}(4e_{rz}^3c^{-1}+12e_{rz}^2c^{-2}\kappa_{10}+12e_{rz}c^{-3}\kappa_{10}^2+4c^{-4}\kappa_{10}^3)(r-r_0)^2}{4c^2(1+\chi(e_{rz}^4+4e_{rz}^3c^{-1}\kappa_{10}+6e_{rz}^2c^{-2}\kappa_{10}^2+4e_{rz}c^{-3}\kappa_{10}^3+c^{-4}\kappa_{10}^4))/2)^3} + \dots,
\end{aligned}$$



многоточиями в которых показаны слагаемые порядка $o(r^2)$ и не приведены здесь из-за своей громоздкости.

Заключение

В рамках теории больших деформаций получено приближённое решение задачи определения деформированного состояния в материале несжимаемого цилиндрического упруговязкопластического слоя с расходящимися ударными волнами при помощи нелинейного лучевого метода.

Наличие предварительных деформаций, а также условие достижения состояния текучести в момент начала приложения ударного воздействия позволили получить аналитические выражения для прифронтных асимптотик. Ранее подобные расчёты напряжённо-деформированного состояния проводились для упругого слоя с предварительными антиплоскими деформациями [0; 10], здесь же за счёт значительных величин прикладываемых нагрузок было исследовано влияние вязких и пластических свойств материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабичева, Л. А. Лучевой метод решения динамических задач в упруговязкопластических средах / Л. А. Бабичева, Г. И. Быковцев, Н. Д. Вервейко // Прикладная математика и механика. – 1973. – Т. 37. – № 1. – С. 145-155.
2. Безгласный, П. А. О распространении ударных волн в упруговязкопластической среде / П. А. Безгласный, Н. Д. Вервейко // Механика твёрдого тела. – 1971. – № 5. – С. 71-76.
3. Буренин, А. А. Большие необратимые деформации и упругое последствие / А. А. Буренин, Л. В. Ковтанюк. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 312 с.
4. Буренин А. А. Лучевой метод решения одномерных задач нелинейной динамической теории упругости с плоскими поверхностями разрывов / А. А. Буренин, Ю. А. Россихин // Прикладные задачи механики деформируемых сред. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1991. – С. 129-137.
5. Буренин А. А. Лучевой метод в приближённом решении задачи об ударном нагружении несжимаемого цилиндрического слоя / А. А. Буренин, Г. М. Севастьянов, В. И. Штука // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9. – № 4. – С. 400-411.
6. Зволинский, Н. В. Динамика деформируемых твёрдых тел / Н. В. Зволинский, М. И. Рейтман, Г. С. Шапиро // В кн.: Механика в СССР за 50 лет. – Т. 3. Механика деформируемого твёрдого тела. – М.: Наука, 1972. – С. 291-323.
7. Ковтанюк, Л. В. Исследование цилиндрических ударных волн в упруговязкопластических несжимаемых телах с помощью метода лучевых рядов / Л. В. Ковтанюк, В. И. Штука // Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И. Я. Яковлева. Механика предельного состояния. – 2017. – № 2(32). – С. 119-135.
8. Лурье А. И. Нелинейная теория упругости / А. И. Лурье. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
9. Рейнер, М. Реология / М. Рейнер – М.: Наука, 1965. – 224 с.
10. Севастьянов, Г. М. Лучевой метод в приближённом решении задачи об ударном нагружении несжимаемого цилиндрического слоя / Г. М. Севастьянов, В. И. Штука, А. А. Буренин // Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И. Я. Яковлева. Механика предельного состояния. – 2015. – № 4(26). – С. 52-60.
11. Шрамм, Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм; пер. с англ. И. А. Лавыгина. – М.: КолосС, 2003. – 321 с.
12. Achenbach, S. D. Note on wave propagation in linearly viscoelastic media / S. D. Achenbach, D. R. Reddy // Zeitschr. fur angew. Math. und Phys., 1967. – Vol. 18. – P. 141-144.
13. Rossikhin, Yu. A. On construction of uniformly fit ray decompositions for solving dynamical problems of linear viscoelasticity / Yu. A. Rossikhin, M. V. Shitikova // Soviet Appl. Mech. (Engl transl). – 1991. – Vol. 27. – № 1. – P. 77-82.
14. Rossikhin, Yu. A. Ray method for solving dynamic problems connected with propagation of wave surfaces of strong and weak discontinuities / Yu. A. Rossikhin, M. V. Shitikova // Appl. Mech. Rev. – 1995. – Vol. 48. – № 1. – P. 1-39.
15. Tomas, T. Y. Plastic Flow and fracture in solids / T. Y. Tomas. – New York, London: Academic Press, 1961. – 271 p.

Буренин А. А.

К ПОСТРОЕНИЮ ТЕОРИИ ТЕРМОУПРУГОСТИ ПРИ КОНЕЧНОЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА

Буренин А. А.

A. A. Burenin

К ПОСТРОЕНИЮ ТЕОРИИ ТЕРМОУПРУГОСТИ ПРИ КОНЕЧНОЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА

TO CONSTRUCTION OF THE THERMAL ELASTICITY THEORY AT THE FINAL VELOCITY OF THE HEAT EXPANSION

Буренин Анатолий Александрович – член-корреспондент Российской академии наук, профессор, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mail@imim.ru.

Mr. Anatoliy A. Burenin – Corresponding member of Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Principal researcher of the Institute of Machinery and Metallurgy Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mail@imim.ru.

Аннотация. Предлагается оригинальная математическая модель термоупругости, в которой тепло распространяется с конечной скоростью. В отличие от широко распространённого обобщения закона теплопроводности Фурье, связанного с гипотезой конечного времени релаксации теплового потока, используется предположение о зависимости коэффициента теплопроводности от температуры и её производных. Замечено, что на таком пути имеется возможность получить уравнение теплопроводности, включая его линейный вариант гиперболического типа.

Summary. An original mathematical model of thermoelasticity is proposed, in which heat propagates at a finite rate. In contrast to the widespread generalization of the Fourier thermal conductivity law associated with the hypothesis of a finite relaxation time of a heat flux, the assumption of the dependence of the thermal conductivity on temperature and its derivatives is used. It is noticed that on such a path it is possible to obtain the heat equation, including its linear version, of hyperbolic type.

Ключевые слова: термоупругость, гиперболическая теплопроводность, конечная скорость распространения тепла.

Key words: thermoelasticity, hyperbolic thermal conductivity, finite burning rate.

УДК 539.3

Работа выполнена в рамках государственного задания № 007-00285-18-00.

Классическая теория теплопроводности при постоянном коэффициенте теплопроводности в законе Фурье приводит, как известно, к параболическому уравнению теплопроводности и, как следствие, к парадоксу бесконечной скорости распространения тепла. С целью исключения данного парадокса, основываясь на вполне внятной гипотезе о конечном времени релаксации теплового потока, Вернотте и Каттанео предложили обобщение закона Фурье, которое нашло многочисленных последователей. Термодинамическое обоснование этой гипотезы предпринял А. В. Лыков [5]. В рамках такого обобщения закона теплопроводности было поставлено и решено множество достаточно разных задач термомеханики [1; 8; 9; 11]. Укажем более современные публикации [4; 6; 10]. Формулировка дифференциальной зависимости между тепловым потоком и градиентом температуры приводит к недивергентным соотношениям теории и выходит за рамки классической неравновесной термодинамики [3]. Настоящей заметкой укажем возможность построения модели гиперболической теплопроводности не выходя за рамки формализма термодинамики необратимых процессов.

Полагаем, что движение термоупругой среды задаётся в системе прямоугольных декартовых координат $x_i (i = 1, 2, 3)$. Когда область деформирования не включает в себя поверхностей разрывов деформаций, имеем локальную формулировку закона сохранения энергии [2]:

$$\rho \frac{de}{dt} + q_{j,j} = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

где $\rho = \rho(x_1, x_2, x_3, t)$; $e = e(x_1, x_2, x_3, t)$ – плотность среды и плотность распределения внутренней энергии; q_j – компоненты вектора потока тепла, индекс после запятой означает дифференцирование по соответствующей пространственной координате; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ε_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций.

Рассмотрим простейший случай, считая деформации e_{ij} малыми, тогда

$$e_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}); \quad \varepsilon_{ij} = \frac{de_{ij}}{dt} = \frac{\partial e_{ij}}{\partial t} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad v_i = \frac{du_i}{dt} = \frac{\partial u_i}{\partial t}. \quad (2)$$

В (2) u_i, v_i – компоненты векторов перемещений и скоростей перемещений точек среды.

Функцию $e(e_{ij}, s)$ можно рассматривать в качестве термодинамического потенциала [2; 7].

Однако более удобным оказывается принятие иного термодинамического потенциала $\psi = \psi(e_{ij}, T)$, называемого свободной энергией. Аргументами этих функций наряду с деформациями выступают абсолютная температура T и плотность распределения энтропии s . Законы термодинамики задают следующую связь между введёнными термодинамическими потенциалами:

$$e(e_{ij}, s) = \psi(e_{ij}, T) - sT; \quad \frac{\partial e}{\partial s} = T; \quad \frac{\partial \psi}{\partial T} = -s. \quad (3)$$

Подстановка (2) и (3) в (1) позволяет записать уравнение

$$\left(\rho \frac{\partial \psi}{\partial e_{ij}} - \sigma_{ij} \right) \varepsilon_{ij} + \rho T \frac{ds}{dt} + a_{j,j} = 0.$$

Перепишем это уравнение в форме уравнения баланса для энтропии s [3]:

$$\frac{\partial(\rho s)}{\partial t} = -(\rho s v_j + q_j T^{-1})_{,j} + \left\{ \sigma_{ij} - \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial \Phi}{\partial e_{ij}} \right\} \frac{\varepsilon_{ij}}{T} - \frac{1}{T^2} q_j T_{,j}. \quad (4)$$

$$\Phi = \rho_0^{-1} \psi.$$

Согласно (4) изменение энтропии в теле происходит за счёт потока энтропии, втекающего в выделенный объём, и источников энтропии. Компоненты потока энтропии

$$J_j = \rho s v_j + q_j T^{-1}$$

имеют конвективные и тепловые слагаемые. Источники энтропии в (4) связаны с необратимыми процессами теплопроводности (последнее слагаемое правой части (4)) и деформирования (предпоследнее слагаемое правой части). Введённую в (4) функцию $\Phi(e_{ij}, T)$ называют термоупругим потенциалом.

Термоупругое деформирование предполагают обратимым по определению так же, как и изотермическое упругое. Имеется в виду, что производства энтропии в таком процессе не происходит. Применительно к уравнению баланса энтропии (4) это означает, что источник энтропии в нём, связанный с деформированием среды, обязан отсутствовать. Таким способом получаем

$$\sigma_{ij} = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial \Phi}{\partial e_{ij}}.$$

Учитывая, что в условиях малости деформаций $\rho = \rho_0(1 + e_{kk} + \dots) = \rho_0 + \dots$, имеем окончательно

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Phi(e_{ij}, T)}{\partial e_{ij}}; \quad s = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \Phi}{\partial T}. \quad (5)$$

Вторым следствием (4) является условие для источника энтропии, следующее из второго закона термодинамики:

$$-\frac{1}{T^2} q_j T_{,j} \geq 0. \quad (6)$$

В классической неравновесной термодинамике [9] данное требование выполняют следованием линейного закона

$$q_i = -\beta_{ij} T_{,j}. \quad (7)$$

Коэффициенты β_{ij} в (7) могут быть постоянными, зависеть от температуры и производных температуры, но с необходимостью удовлетворяют соотношениям взаимности Онзагера, то есть всегда $\beta_{ij} = \beta_{ji}$. Подставляя (7) в (6), получаем

$$\beta_{ij} T_{,i} T_{,j} \geq 0.$$

Следовательно, при постоянных β_{ij} эти шесть теплофизических констант обязаны удовлетворять условию положительной определённости данной квадратичной формы. В самом простейшем случае

$$\beta_{ij} = \beta \delta_{ij}; \quad q_j = -\beta T_{,j}; \quad \beta > 0; \quad \beta - \text{const}. \quad (8)$$

Зависимости (8) следуют при изотропии в теплофизических свойствах сплошной среды. Пропорциональность теплового потока градиенту температуры называют законом теплопроводности Фурье, а постоянную β называют коэффициентом теплопроводности. Вместе с уравнением движения

$$\sigma_{ij,j} + \rho \chi_i = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (9)$$

соотношения (2), (5) и (8) (или (7) для анизотропной среды) составляют замкнутую систему уравнений, если только термоупругий потенциал $\Phi = \Phi(e_{ij}, T)$ будет задан. В (9) $\chi_i = \chi_i(x_1, x_2, x_3, t)$ – задаваемая плотность распределения массовых сил.

Далее, рассмотрим простейший случай линейной изотропной среды, что послужит основному предложению настоящей заметки. В этом случае термоупругий потенциал является функци-

ей инвариантов тензора деформаций, а тензор теплофизических свойств β_{ij} является шаровым, то есть следует закон теплопроводности Фурье. Принимая в качестве инвариантов тензора деформаций (это наш произвол) $I_1 = e_{kk}$ и $I_2 = e_{ij}e_{ji}$ и ограничиваясь, следуя классическому случаю, квадратичными слагаемыми по деформациям и относительной температуре θ в разложении функции $\Phi = \Phi(I_1, I_2, \theta)$ в ряд Маклорена относительно свободного состояния, запишем

$$\Phi(I_1, I_2, \theta) = \frac{\lambda}{2} I_1^2 + \mu I_2 - \nu_1 I_1 \theta - \frac{\nu_2}{\alpha} \theta^2; \quad \theta = \frac{T - T_0}{T_0}. \quad (10)$$

Подстановка (1) в (5) позволяет записать следующее:

$$\sigma_{ij} = (\lambda e_{kk} - 3\alpha K T_0 \theta) \delta_{ij} + 2\mu e_{ij}. \quad (11)$$

Зависимости (11) называют законом Дюгамеля – Неймана [7]. В них α – коэффициент линейного расширения; $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ – модуль всестороннего сжатия; λ, μ – изотермические параметры Ламе. Последнее обстоятельство следует учитывать при построении теории термоупругости, так как оно подразумевает, что тепловые процессы преобладают над деформационными, по существу, задавая последние. В задачах теплового удара это часто бывает не так. Далее, специально остановимся на этом вопросе.

Подстановка (1) в (5) приводит к следующей зависимости для плотности распределения энтропии:

$$s = \frac{\nu_1}{\rho_0 T_0} I_1 + \frac{\nu_2}{\rho_0 T_0} \theta.$$

Из уравнения баланса энтропии (4) при отбрасывании нелинейных слагаемых за счёт малости e_{ij} и θ получаем классическое уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \theta_{,ij} - \delta e_{mm} + \omega, \quad (12)$$

где $a = \frac{\beta}{\nu_2}$ – коэффициент температуропроводности; $\delta = \frac{\nu_1}{\nu_2}$ – коэффициент связанности; ω – задаваемое распределение внутренних источников тепла.

Не вдаваясь в термомеханический смысл введённых постоянных материала (об этом можно прочитать в многочисленных учебниках), заметим только, что связанность δ часто полагают малой и таким способом переходят к несвязанной теории температурных напряжений. Уравнение (12) является классическим уравнением теплопроводности. Именно оно, будучи линейным параболическим уравнением, порождает бесконечно большую скорость в распространении тепла от начинающего действовать источника.

Избежанию данного парадоксального явления служит обобщение закона теплопроводности Фурье, предложенное Вернотте и Каттанео. Оно заключается в предположении об отказе от мгновенного установления теплового потока при возникновении градиента температуры. Постулируется следующая дифференциальная связь между тепловым потоком и градиентом температуры:

$$\tau \frac{dq_i}{dt} + q_j = -\beta T_0 \theta_{,j}. \quad (13)$$

Постоянная τ в (13), называемая временем релаксации теплового потока, имеет размерность времени и оказывается дополнительной постоянной материала. Поступая так же, как и при записи (12), то есть ограничиваясь лишь линейными слагаемыми при малых деформациях и относительной температуры θ , найдём

$$\theta_{,ij} - \frac{1}{b^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0; \quad b^2 = \frac{\beta}{\tau v_2}. \quad (14)$$

Уравнение (14) является гиперболическим (волновым) уравнением. В нём постоянная b имеет размерность скорости. Именно (14) составляет основание теории теплопроводности с конечной (в таком простейшем случае постоянной) скоростью b распространения тепла. Интерес к данному подходу в построении гиперболической теплопроводности неизменен, как отмечалось, до настоящего времени [1; 4; 6; 9; 10; 11].

Очевидно, что закон теплопроводности (13) не укладывается в формализм неравновесной термодинамики [3]. Это приводит к целому ряду неудобств; из-за этого систему уравнений не удаётся привести к дивергентному виду и записать соответствующие динамические условия совместности разрывов, несмотря на то, что поверхности разрывов температуры в этой математической модели имеют место. В настоящей заметке укажем иную возможность построения модели термоупругой среды, в которой тепло распространяется с конечной скоростью. При этом выполним требование о том, чтобы предложенная модель не выходила за рамки формализма неравновесной термодинамики. С этой целью возвратимся к закону теплопроводности Фурье (8). Коэффициент теплопроводности β в нём постоянен только при температурах, незначительно отклоняющихся от начальных, что является известным опытным фактом. Более того, он оказывается различным при разных градиентах температуры и это также часто используется в технических приложениях теории теплопроводности. Следуя принципу равноприсутствия, считаем, что он также зависит от частной производной от температуры по времени. Следовательно, полагаем

$$q_j = -\beta(\theta, \xi, \eta) \theta_{,j}, \quad (15)$$

где $\xi = (\theta_{,j} \theta_{,j})^{1/2}$; $\eta = \left| \frac{\partial \theta}{\partial t} \right| \xi^{-1}$. Здесь учтено, что коэффициент теплопроводности не может зависеть от векторной величины $\theta_{,j}$, иначе он бы менял знак в зависимости от направления вектора. Из этих же соображений при выборе параметра η поставлен знак модуля у производной θ по времени. Полагая параметры θ , ξ и η малыми, разложим функцию $\beta(\theta, \xi, \eta)$ в степенной ряд:

$$\beta(\theta, \xi, \eta) = \beta_0 \left(1 + \gamma_1 \theta + \gamma_2 \xi + \frac{2}{c} \eta + \dots \right). \quad (16)$$

$$\beta_0 = \beta \left|_{\substack{\theta=0 \\ \xi=0 \\ \eta=0}}; \quad \gamma_1 = \beta_0^{-1} \frac{\partial \beta}{\partial \theta} \left|_{\substack{\theta=0 \\ \xi=0 \\ \eta=0}}; \quad \gamma_2 = \beta_0^{-1} \frac{\partial \beta}{\partial \xi} \left|_{\substack{\theta=0 \\ \xi=0 \\ \eta=0}}; \quad 2c^{-1} = \beta_0^{-1} \frac{\partial \beta}{\partial \eta} \left|_{\substack{\theta=0 \\ \xi=0 \\ \eta=0}}.$$

С целью предельной простоты дальнейшего рассмотрим одномерный случай, когда $\theta = \theta(x = x_1, t)$. Тогда $\xi = |\theta_{,x}|$ и $\eta = \xi^{-1} |\theta_{,t}|$. Если считать, что границей теплопроводящего тела (полупространства $x \geq 0$) является плоскость $x = 0$, то при нагреве $\theta_{,x} < 0$ и $\theta_{,t} > 0$, а при остывании, наоборот, $\theta_{,x} > 0$ и $\theta_{,t} < 0$. Следовательно, в любом случае $\eta = -\theta_{,x}^{-1} \theta_{,t}$. Пренебрегая связанно-

стью процессов деформирования и теплопередачи (считая $\delta = 0$) и ограничиваясь линейными слагаемыми, получаем $s = \frac{v_2}{\rho_0 T_0} \theta$; $\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{2\beta_0}{c} - \beta_0 \theta_{,xx}$.

Подстановка этих зависимостей в уравнение баланса энтропии $\rho_0 T_0 \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$ приводит к уравнению теплопроводности в форме

$$v_2 \theta_{,t} + \frac{2\beta_0}{c} \theta_{,xt} - \beta_0 \theta_{,xx} + \omega = 0. \quad (17)$$

Уравнение (17) относится к гиперболическому типу линейных уравнений в частных производных второго порядка. Перепишем (17) в форме волнового уравнения. Для этой цели перейдём к новым независимым переменным $y = x$; $z = x - ct$. Уравнение теплопроводности (17) в переменных y, z принимает вид

$$\theta_{,zz} - \theta_{,yy} + \frac{v_2 c}{\beta_0} \theta_{,zz} + \frac{1}{\beta_0} \omega = 0. \quad (18)$$

Постоянную c , имеющую размерность скорости, следует считать скоростью распространения тепла.

Таким образом, здесь указана только возможность построения математической модели термоупругой среды с конечной скоростью распространения тепла, не покидая формализм неравновесной термодинамики. Данная возможность поэтому принципиально отлична от широко используемой модели, основанной на гипотезе релаксации теплового потока (13). Дальнейшее развитие предложенного подхода оставляем для заинтересованного читателя. Важным в таком развитии может оказаться следующее отличие в уравнениях (14) и (18) или, что то же в законах теплопроводности (13) и (15): если при использовании (13) передний фронт ударного теплового воздействия связан с разрывом в температуре $[\theta] \neq 0$, то в предлагаемой модели всегда $[\theta] = 0$ и только производные θ претерпевают разрыв на фронтальных поверхностях.

Необходимо также заметить, что математические модели, представленные выше, основаны на построениях, использующих в качестве термодинамического потенциала плотность распределения свободной энергии $\psi(x_1, x_2, x_3, t)$. Когда механические параметры преобладают над тепловыми, например, в задачах ударного механического нагружения, то в качестве термодинамических потенциалов следует использовать плотность распределения внутренней энергии $e(x_1, x_2, x_3, t)$ либо соответствующий аналог потенциала Гиббса $\gamma(\sigma_{ij}, s) = e - \sigma_{ij} e_{ij}$. В таком случае в качестве параметров Ламе следует использовать их адиабатические значения, так же как и для параметров податливости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баскаков, В. А. К изучению свойств сильных разрывов в нелинейной термоупругой среде / В. А. Баскаков, М. С. Чирко // Механика деформируемых сред. – Куйбышев: Изд-во Куйбышевского университета, 1979. – Вып. 4. – С. 26-30.
2. Буренин, А. А. Большие необратимые деформации и упругое последствие / А. А. Буренин, Л. В. Ковтанюк. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 312 с.
3. Де Грот, С. Неравновесная термодинамика / С. Де Грот, П. Мазур. – М.: Мир, 1964. – 456 с.
4. Кривцов, А. М. Распространение тепла в бесконечном одномерном гармоническом кристалле / А. М. Кривцов // ДАН. – 2015. – Т. 464. – № 2. – С. 162-166.
5. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 638 с.

6. Мурашкин, Е. В. О сильных и слабых разрывах связанного термомеханического поля в термоупругих микрополярных континуумах второго типа / Е. В. Мурашкин, Ю. Н. Радаев // Вестник Самарского государственного технического университета. Физико-математические науки. – 2014. – Вып. 4(37). – С. 85-97.
7. Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
8. Подстригач, А. В. Обобщённая термомеханика / А. В. Подстригач, Ю. М. Коляно. – М.: Киев: Наукова думка. – 1976. – 311 с.
9. Шаталов, А. Г. Разрывные решения в связанной задаче термоупругости / А. Г. Шаталов // Механика деформируемых сред. – Куйбышев: Изд-во Куйбышевского университета, 1979. – Вып. 4. – С. 85-90.
10. Babenkov, M. B. Analysis of the wave propagation processes in heat transfer problems of the hyperbolic type / M. B. Babenkov, E. A. Ivanova // Continuum Mech. and Thermodyn. – 2013. – V. 26. – № 1. – P. 483-502.
11. Chandrasekharaiah, D. S. Thermoelasticity with Second Sound: A Review / D. S. Chandrasekharaiah // Appl. Meh. Rev. 1986. – V. 39 – № 3. – P. 335-376.



Козин В. М., Земляк В. Л., Кожяев А. В.
V. M. Kozin, V. L. Zemlyak, A. V. Kozhaev

**ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЬДА НА ПАРАМЕТРЫ
РЕЗОНАНСНЫХ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН**

**INFLUENCE OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ICE
ON THE PARAMETERS OF RESONANT FLEXURAL-GRAVITY WAVES**

Козин Виктор Михайлович – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Механика деформирования» Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Metallургов, 1. E-mail: kozinvector@rambler.ru.

Mr. Victor M. Kozin – Dr. habil. of Engineering, principal research associate, Institute of Engineering and Metallurgy, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists' str. E-mail: kozinvector@rambler.ru.

Земляк Виталий Леонидович – кандидат физико-математических наук, проректор по науке и инновациям Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (Россия, Биробиджан); 679015, Еврейская автономная область, г. Биробиджан, ул. Широкая, 70а. E-mail: vellkom@list.ru.

Mr. Vitaly L. Zemlyak – Ph.D, vice-rector on scientific work and innovations of Priamursky state University named after Sholom-Aleichem (Russia, Birobidzhan); 679015, Jewish Autonomous region, Birobidzhan, 70a Shirokaya str. E-mail: kozinvector@rambler.ru.

Кожяев Александр Владимирович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: alekzoid@gmail.com.

Mr. Alexander V. Kozhaev – Ph.D student of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: alekzoid@gmail.com.

Аннотация. В данной статье рассматривается влияние изменения физико-механических свойств льда на параметры резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ). Отмечается целесообразность использования в расчётах как средних, общеизвестных значений наиболее вероятных характеристик льда, так и соответствующих конкретным ледовым условиям.

Summary. The influence of changes in the physicomachanical properties of ice on the parameters of resonant flexural-gravity waves (IGW) is considered. It is noted that it is expedient to use in the calculations both the average, well-known values of the most probable characteristics of ice, and those corresponding to specific ice conditions.

Ключевые слова: резонансные изгибно-гравитационные волны, физико-механические свойства льда, модель Кельвина – Фойгта, напряжённо-деформированное состояние.

Key words: resonant flexural-gravity waves, physical and mechanical properties of ice, Kelvin – Fought model, stress-strain state.

УДК 532.59:629.576

Работа выполнена за счёт средств гранта Российского научного фонда № 16-19-10097 «Исследование влияния ледовых условий на возможность всплытия подводных судов в ледяном покрове».

Введение

Многие экономически развитые страны имеют замерзающие реки, омываются морями, которые в различной степени и на разные сроки покрываются льдом. Лёд является серьёзным препятствием для судоходства, доставки грузов, добычи полезных ископаемых.

Одним из возможных способов решения данной проблемы может служить резонансный метод разрушения ледяного покрова [2].

При выполнении теоретических исследований часто используют наиболее вероятные значения физико-механических свойств льда. Однако состояние льда нестабильно и изменяется в зависимости от времени года, атмосферных условий и пр. Поэтому целесообразно исследовать, какие из физико-механических свойств льда оказывают значительное влияние на характер изгибно-гравитационных волн при изменении их в известных пределах, то есть при их отличии от наиболее вероятных величин.

Теоретические исследования влияния физико-механических свойств льда на параметры ИГВ

Колебания ледяного покрова рассматривались в линейной постановке. Лёд моделировался изотропной вязкоупругой пластиной бесконечной протяжённости, поведение которой описывалось моделью Кельвина – Фойгта [5]. Механическая модель приведена на рис. 1.

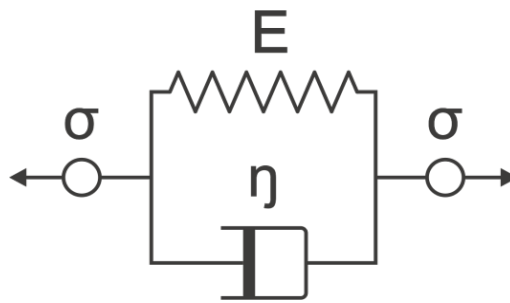


Рис. 1. Модель вязкоупругой среды Кельвина – Фойгта

В этом случае дифференциальное уравнение изгиба ледяного покрова имеет вид [1]

$$D \left(1 + \tau_f \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla^4 w + \rho_i h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho_w g w + \rho_w \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = \delta(x - vt, y) P(x, y, t); \quad (1)$$

потенциал движения жидкости Φ удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0; \quad (2)$$

граничные условия на дне водоёма и на границе лёд-вода:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{z=-H} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad (4)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жёсткость пластины; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; w – прогиб льда; ρ_i, ρ_w – плотности льда и воды соответственно; P – нагрузка на лёд.

Применяя преобразование Фурье к дельта-функции, получим

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i[\lambda(x-vt)+\eta y]} d\lambda d\eta.$$

Потенциал движения жидкости Φ в соответствии с [5] имеет вид

$$\Phi = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{\lambda\eta} ch \left[(H+z) \sqrt{(\lambda^2 + \eta^2)} \right] e^{-i[\lambda(x-vt)+\eta y]} d\lambda d\eta.$$

Функцию прогиба будем искать аналогично [1]:

$$w = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} w_{\lambda\eta} e^{-i[\lambda(x-vt)+\eta y]} d\lambda d\eta.$$

Применив оператор Гамильтона к функции прогиба w и с учётом условий (2), (3), (4), приняв $P = \text{const}$, $v = \text{const}$, получим [1]

$$w = \frac{P}{\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-i[\lambda(x-vt)+\eta y]}}{F(\lambda, \eta)} d\lambda d\eta,$$

где
$$F(\lambda, \eta) = D(\lambda^2 + \eta^2) + D\tau_\phi i\lambda v(\lambda^2 + \eta^2) - \rho_w g - \rho_i h v^2 \lambda^2 - \frac{\rho_w \lambda^2 v^2}{th \left(H \sqrt{(\lambda + \eta) \sqrt{\lambda + \eta}} \right)}.$$

Для нагрузки с прямоугольным основанием длиной $2a$, шириной $2b$ получим функцию прогиба [1]:

$$w = \frac{1}{\pi^2} \int_{-a}^{+a} \int_{-b}^{+b} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{q(\xi, \zeta) e^{-i[\lambda(x-\xi-vt)+\eta(y-\zeta)]}}{F(\lambda, \eta)} d\lambda d\eta d\xi d\zeta.$$

Преобразуя числитель по формуле Эйлера и исключая мнимую часть, окончательно получим [1]

$$w = \frac{-4P}{\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{C(A \cos(\phi) - B \sin(\phi))}{\lambda \eta (A^2 + B^2)} d\lambda d\eta, \quad (5)$$

где

$$A = D(\lambda^2 + \eta^2)^2 + \rho_w g - \rho_i h v^2 \lambda^2 - \frac{\rho_w \lambda^2 v^2}{th \left(H \sqrt{\lambda^2 + \eta^2} \right) \sqrt{\lambda^2 + \eta^2}},$$

$$B = D\tau_i \lambda v (\lambda^2 + \eta^2)^2, \quad C = \cos(\eta y) \sin(\lambda b) \sin(\eta a), \quad \phi = \lambda(x - vt).$$

Сопоставление результатов численных расчётов с данными натуральных экспериментов [6] при принятых физико-механических параметрах льда, а именно: $\rho_i = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\rho_w = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

$\tau_f = 10 \text{ с}$; $\mu = \frac{1}{3}$; $E = 0,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $h = 0,075 \text{ м}$; $H = 6,8 \text{ м}$; $2a = 1,23 \text{ м}$; $2b = 0,48 \text{ м}$; $P = 406,5 \text{ Па}$ представлены на рис. 2. Направление движения нагрузки указано стрелкой, ось приложения нагрузки указана вертикальной линией.

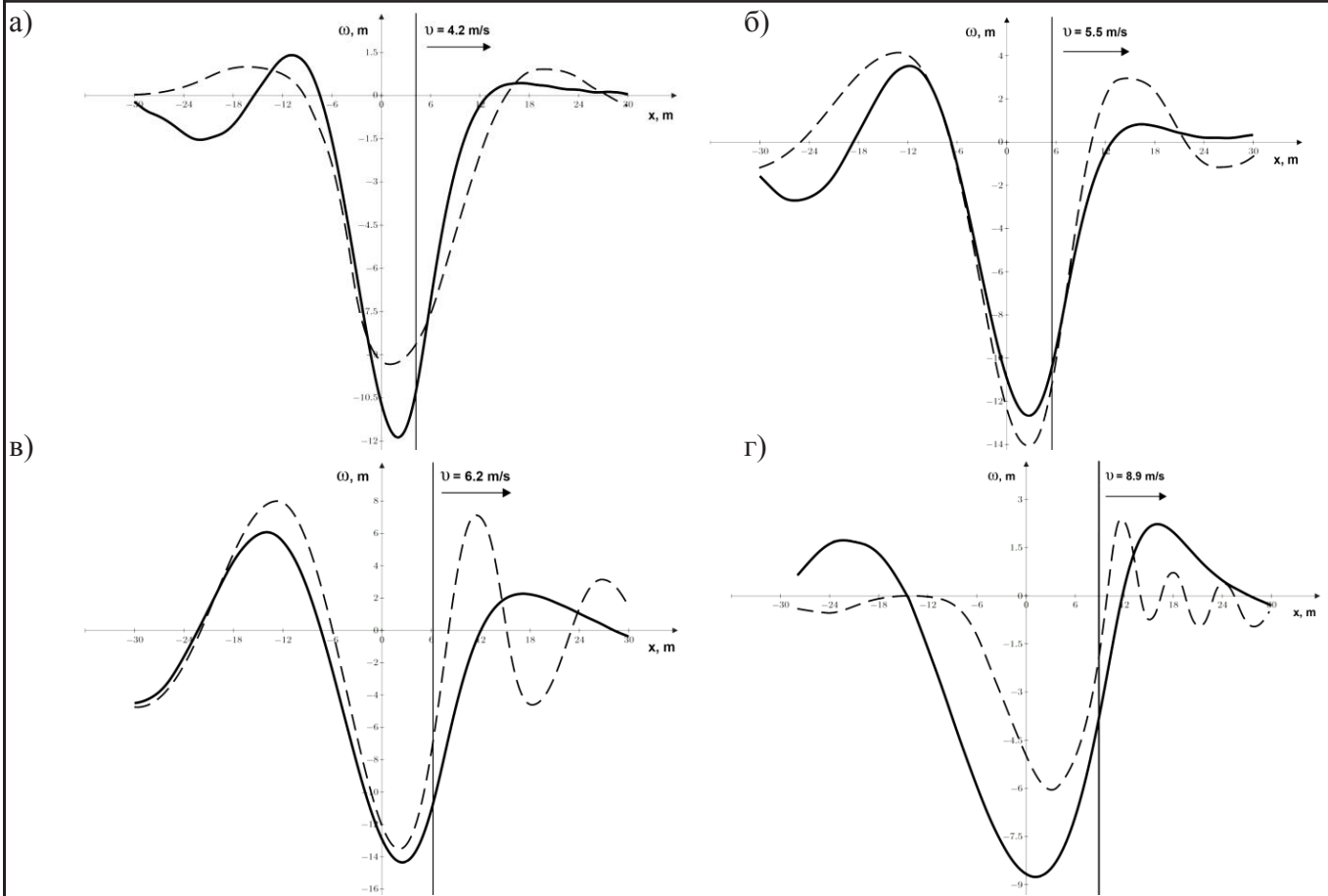


Рис. 2. Сопоставление численных расчётов с данными натуральных экспериментов

а) $v = 4,2$ м/с; б) $v = 5,5$ м/с; в) $v = 6,2$ м/с; г) $v = 8,9$ м/с

(-) – численный результат; (--) – натуральный эксперимент

Как видно из рис. 2, результаты численных расчётов удовлетворительно совпадают в области больших прогибов, то есть при возникновении наибольших напряжений.

Для полученной функции прогиба (5) выражения для погонных нормальных напряжений σ_x и σ_y будут иметь вид [4]

$$\sigma_x = \frac{6M_x}{h^2}; \quad \sigma_y = \frac{6M_y}{h^2}, \quad (6), (7)$$

где

$$M_x = -D \left(1 + \tau_\phi \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad (8)$$

$$M_y = -D \left(1 + \tau_\phi \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right). \quad (9)$$

Подставив (5) в уравнения (8) и (9), найдём соответствующие частные производные. Обозначив их за $F_i, i \in [1; 6]$, получим выражения для изгибающих моментов:

$$M_x = -D(F_1 + \mu F_2 + \tau_\phi(F_4 + \mu F_5)), \quad (10)$$

$$M_y = -D(F_2 + \mu F_1 + \tau_\phi(F_5 + \mu F_4)). \quad (11)$$

Влияние физико-механических свойств льда на параметры резонансных изгибно-гравитационных волн

Состояние льда характеризуют следующие физико-механические свойства: модуль Юнга E , коэффициент Пуассона μ и плотность ρ_i . В зависимости от времени года, атмосферных условий и прочего свойства льда изменяются соответствующим образом.

Известны наиболее вероятные физико-механические свойства льда, которые представлены в табл. 1 и 2 [3].

Таблица 1

Экстремальные и наиболее вероятные значения модуля Юнга

Метод измерения	Температура льда, °С	Модуль Юнга, МПа
Статический	[-3;-8]	2902,7684 – 4314,926
Резонансный	[0;-10]	8629,852 – 9953,74975
Сейсмический	[-5;-10]	6864,655 – 12258,3125
Наиболее вероятные значения:		3923 – 8620

Таблица 2

Наиболее вероятные значения плотности льда и коэффициента Пуассона

Лёд	Плотность, кг/м ³	Коэффициент Пуассона
Пресноводный	870 – 917	0,42 – 0,34
Морской	900 – 910	0,40 – 0,30

Рассмотрим влияние изменения указанных свойств льда на параметры ИГВ в пределах их наиболее вероятных значений. В качестве основных параметров выберем $\rho_i = 900 \text{ кг/м}^3$; $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$;

$$\tau_f = 10 \text{ с}; \mu = \frac{1}{3}; E = 5 \cdot 10^9 \text{ Па}; h = 0,5 \text{ м}; H = 5 \text{ м}; 2a = 30 \text{ м}; 2b = 13 \text{ м}; P = 3330 \text{ Па}; v = 7 \text{ м/с}.$$

Данные параметры соответствуют условиям проведения натуральных испытаний с использованием судна на воздушной подушке (СВП) «Мурена» [4].

Результаты теоретических исследований в диапазоне изменения крайних значений физико-механических свойств льда приведены на рис. 3–11.

При изменении модуля Юнга в диапазоне наиболее вероятных значений амплитуды ИГВ существенно изменяются, что показано на рис. 3. Как видно из рис. 3, при экстремальных значениях модуля Юнга наблюдаются значительные изменения амплитуды ИГВ.

Изменения коэффициента Пуассона и плотности льда практически не влияют на параметры ИГВ, что и показано на рис. 4 и 5.

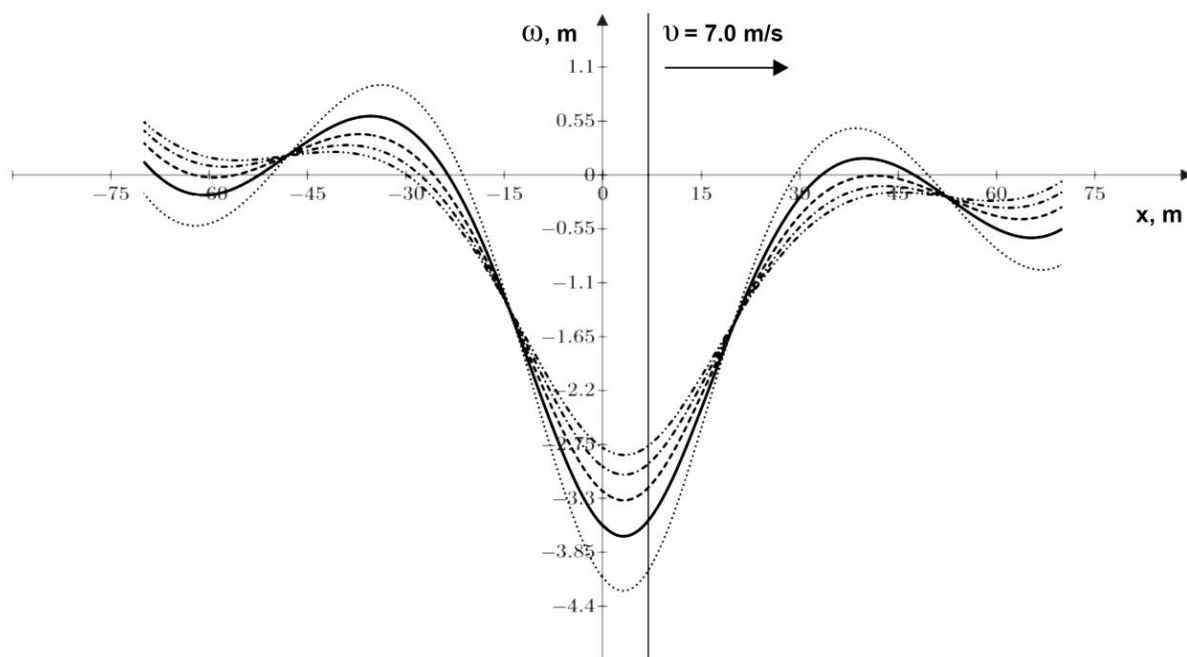


Рис. 3. Влияние изменения модуля Юнга на параметры ИГВ:
 (.....) – $E = 4000$ МПа; (—) – $E = 5000$ МПа;
 (---) – $E = 6000$ МПа; (-·-·) – $E = 7500$ МПа; (-·-·-) – $E = 8500$ МПа

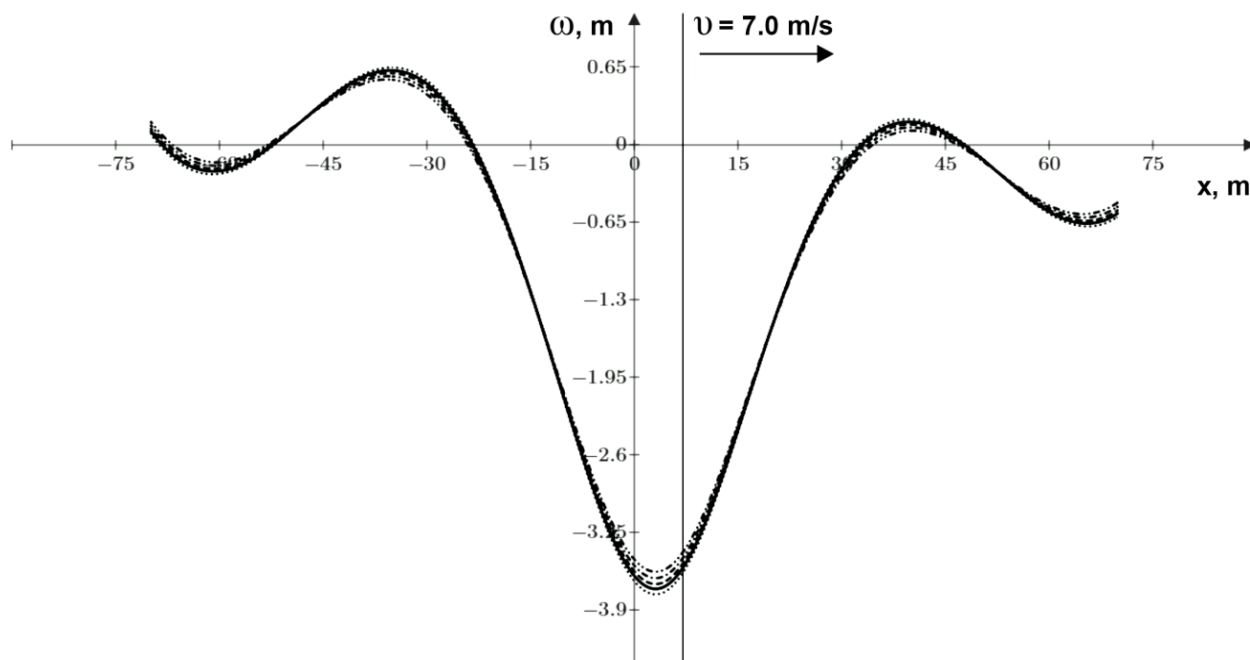


Рис. 4. Влияние изменения коэффициента Пуассона на параметры ИГВ:
 (.....) – $\mu = 0,3$; (—) – $\mu = 0,33$;
 (---) – $\mu = 0,36$; (-·-·) – $\mu = 0,39$; (-·-·-) – $\mu = 0,42$

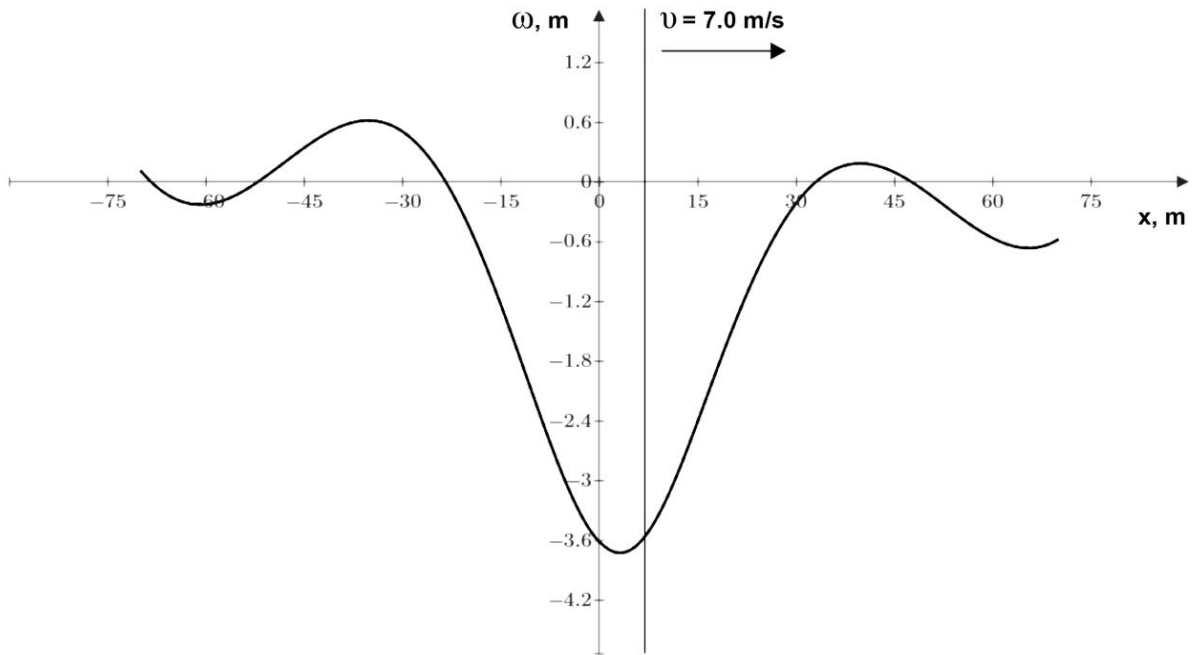


Рис. 5. Влияние изменения плотности льда на параметры ИГВ:

(.....) – $\rho_i = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; (—) – $\rho_i = 850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
(---) – $\rho_i = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; (-·-·) – $\rho_i = 920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; (-··-) – $\rho_i = 950 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

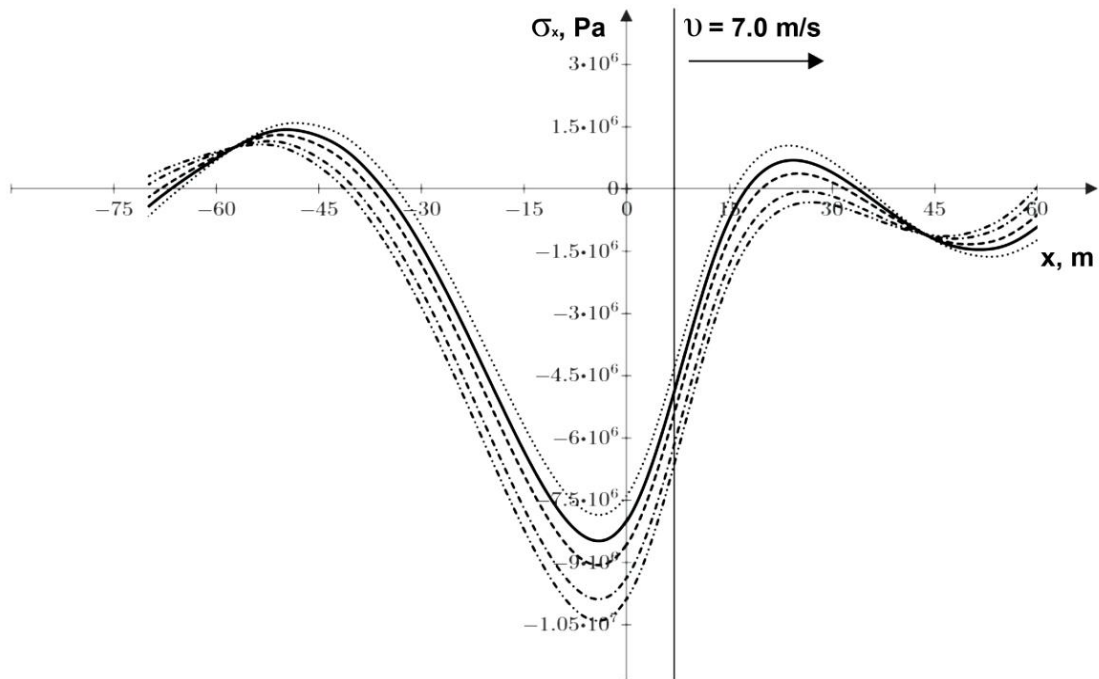


Рис. 6. Влияние изменения модуля Юнга на характер напряжения σ_x :

(-··-) – $E = 4000 \text{ МПа}$; (-·-·) – $E = 5000 \text{ МПа}$;
(---) – $E = 6000 \text{ МПа}$; (—) – $E = 7500 \text{ МПа}$; (.....) – $E = 8500 \text{ МПа}$

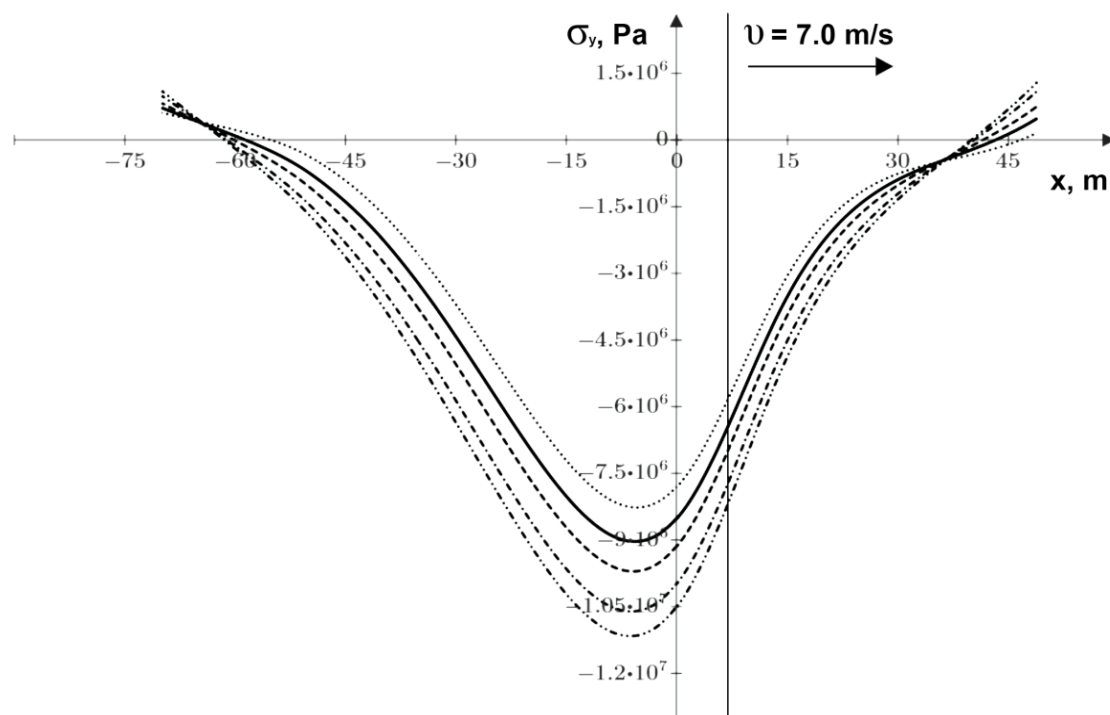


Рис. 7. Влияние изменения модуля Юнга на параметры напряжения σ_y :

(.....) – $E = 4000$ МПа; (—) – $E = 5000$ МПа;

(---) – $E = 6000$ МПа; (-·-·) – $E = 7500$ МПа; (-·-·-) – $E = 8500$ МПа

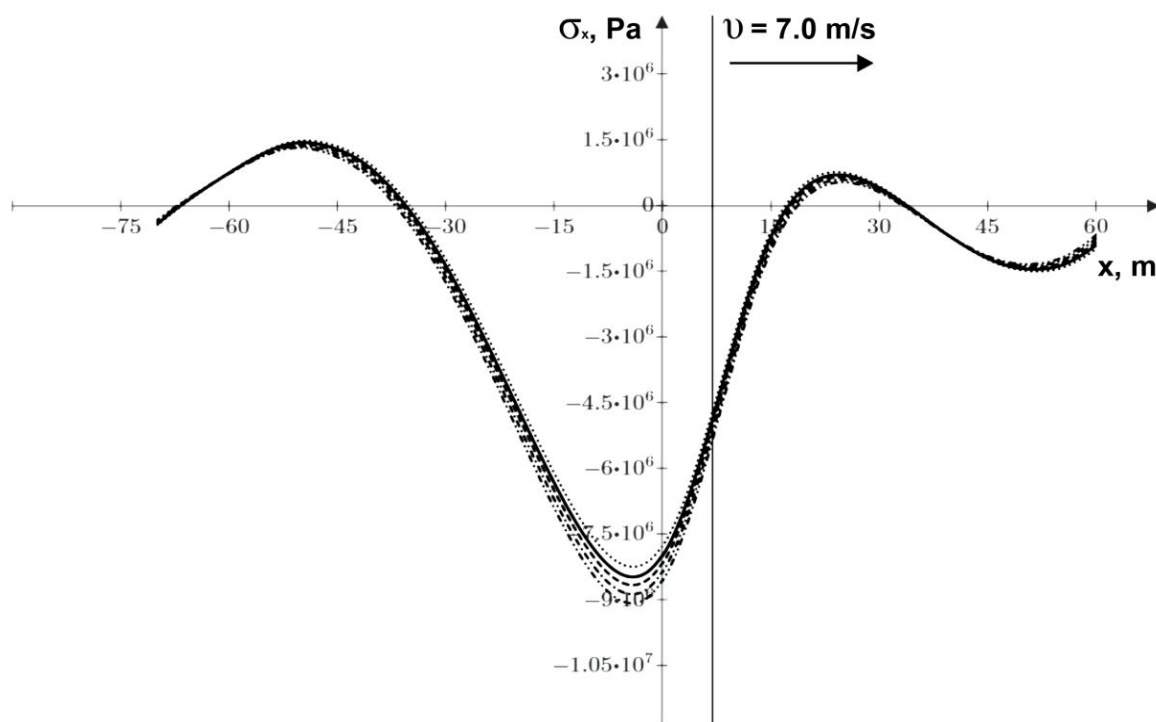


Рис. 8. Влияние изменения коэффициента Пуассона на параметры напряжения σ_x :

(.....) – $\mu = 0,3$; (—) – $\mu = 0,33$;

(---) – $\mu = 0,36$; (-·-·) – $\mu = 0,39$; (-·-·-) – $\mu = 0,42$

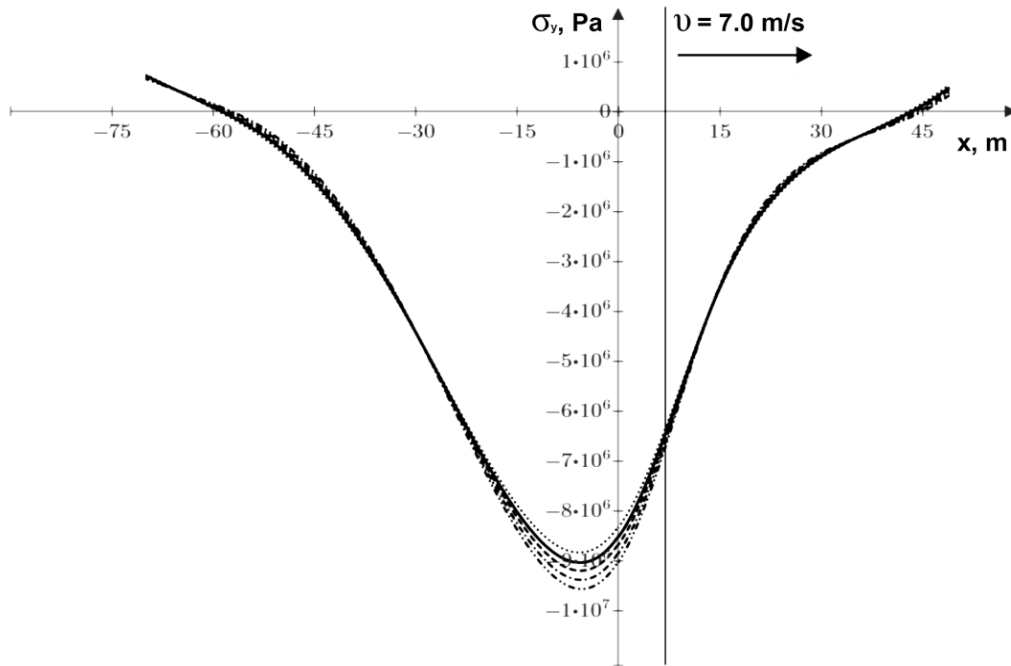


Рис. 9. Влияние изменения коэффициента Пуассона на параметры напряжения σ_y :

(.....) – $\mu = 0,3$; (—) – $\mu = 0,33$;
(---) – $\mu = 0,36$; (-·-·-) – $\mu = 0,39$; (-··-) – $\mu = 0,42$

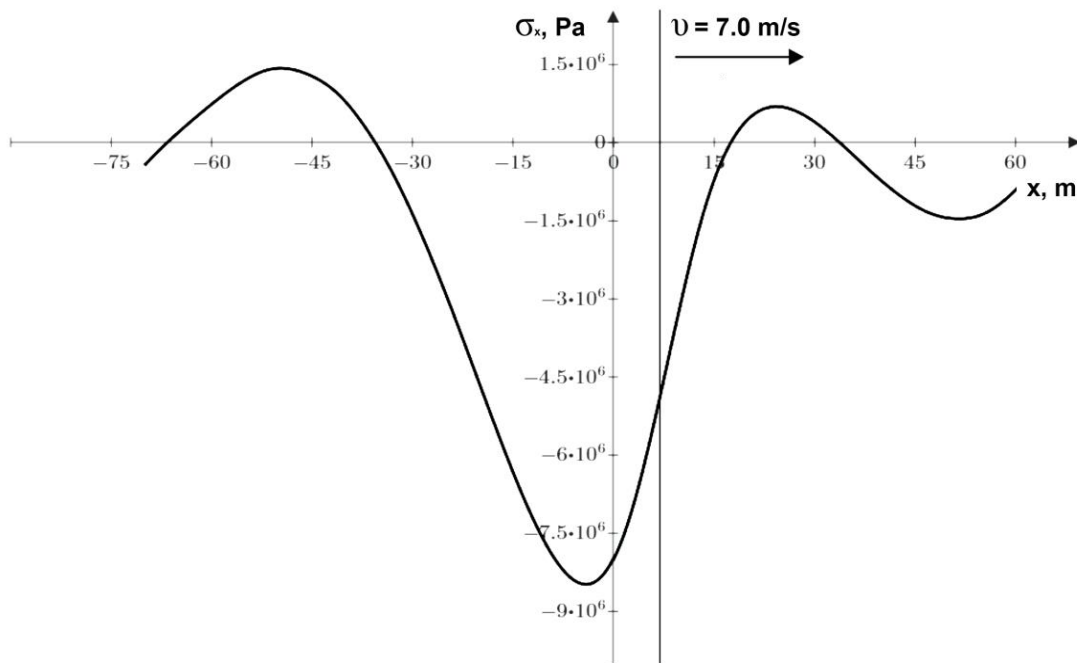


Рис. 10. Влияние изменения плотности льда на параметры напряжения σ_x :

(.....) – $\rho_i = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; (—) – $\rho_i = 850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
(---) – $\rho_i = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; (-·-·-) – $\rho_i = 920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; (-··-) – $\rho_i = 950 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

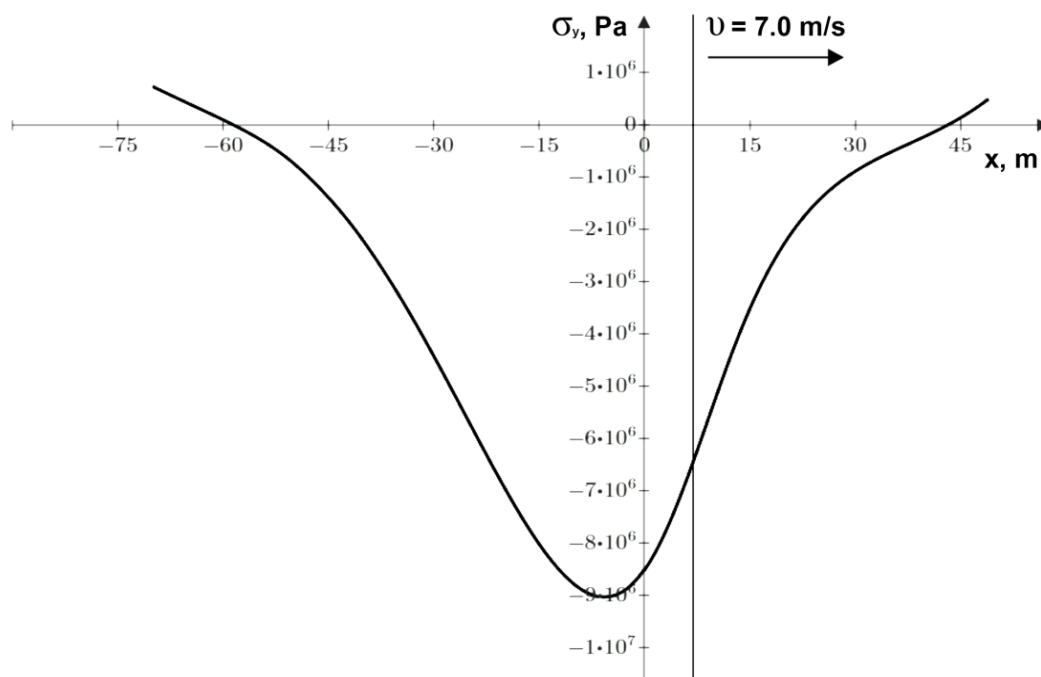


Рис. 11. Влияние изменения плотности льда на параметры напряжения σ_y :

$$\begin{aligned} & (\cdots) - \rho_i = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad (—) - \rho_i = 850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \\ & (- - -) - \rho_i = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad (- \cdot -) - \rho_i = 920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad (- \cdot \cdot -) - \rho_i = 950 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \end{aligned}$$

Таким образом, при использовании СВП в качестве ледоразрушающей нагрузки резонансным методом необходимо учитывать влияние изменения только модуля Юнга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козин, В. М. Волновое сопротивление амфибийных судов на воздушной подушке при движении по ледяному покрову / В. М. Козин, А. В. Погорелова // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44. – № 2. – С. 49-55.
2. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов / В. М. Козин, А. В. Онищук, Б. Н. Марьин [и др.]. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 191 с.
3. Петров, И. Г. Выбор наиболее вероятных значений физико-механических свойств льда / И. Г. Петров // Труды ААНИИ. – 1976. – Т. 331. – С. 4-41.
4. Прикладные задачи динамики ледяного покрова / В. М. Козин, В. Д. Жесткая, А. В. Погорелова [и др.]. – М.: Академия Естественных наук, 2008. – 329 с.
5. Хейсин, Д. Е. Динамика ледяного покрова. / Д. Е. Хейсин. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 215 с.
6. Takizawa, T. Deflection of a floating sea ice sheet induced by a moving load / T. Takizawa // Cold Regions Science and Technology. – 1985. – Vol. 11. – P. 123-139.



Бегун А. С., Ковтанюк Л. В., Лемза А. О.
A. S. Begun, L. V. Kovtanyuk, A. O. Lemza

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА БОЛЬШИХ
ВИСКОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВЯЗКОУПРУГОГО МАТЕРИАЛА
ПРИ ЕГО ОДНОСТОРОННЕМ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИИ**

**MODELING OF THE PRODUCTION PROCESS OF LARGE
VISCOZYMETRIC DEFORMATION OF VISCOELASTIC MATERIAL
WHEN IT IS ONE SIDE SLIPPING**

Бегун Александра Сергеевна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории механики необратимого деформирования Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток); 690041, Приморский край, г. Владивосток, ул. Радио, 5. E-mail: asustinova@mail.ru.

Ms. Alexandra S. Begun – PhD in Phys. & Math., Researcher of the Laboratory of Irreversible Deformation Mechanics, Institute of Automation and Control Processes, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Vladivostok); 690041, Primorsky territory, Vladivostok, 5 Radio str. E-mail: asustinova@mail.ru.

Ковтанюк Лариса Валентиновна – доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией механики необратимого деформирования Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток); 690041, Приморский край, г. Владивосток, ул. Радио, 5. E-mail: lk@iacp.dvo.ru.

Ms. Larisa V. Kovtanyuk – Dr. Sci. Phys. & Math., Head of the Laboratory of Irreversible Deformation Mechanics, Institute of Automation and Control Processes, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Vladivostok); 690041, Primorsky territory, Vladivostok, 5 Radio str. E-mail: lk@iacp.dvo.ru.

Лемза Александр Олегович – аспирант Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток). E-mail: alsu-24@yandex.ru.

Mr. Alexander O. Lemza – Postgraduate Student, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok). E-mail: alsu-24@yandex.ru.

Аннотация. В статье в рамках теории больших деформаций рассматривается деформирование материала с нелинейными упругими и вязкими свойствами, находящегося в зазоре между двумя жёсткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями при вращении одной из жёстких поверхностей и при неподвижности другой. Исследован случай проскальзывания материала в окрестности внутренней стенки. Рассматривается равноускоренное движение вращающегося цилиндра, последующие его движения с постоянной скоростью и дальнейшее равнозамедленное движение до остановки. Рассчитаны напряжения, обратимые и необратимые деформации, перемещения; исследована релаксация напряжений после полной остановки цилиндра. Решение задачи получено в программном комплексе, разработанном на базе системы компьютерной математики Scilab.

Summary. This paper considers a deformation process of a material with nonlinear elastic and viscous properties in the framework of the theory of large strains. The material is placed between two rigid coaxial cylindrical surfaces and deformed at the rotation of one of them while the other one is motionless. The case of material slipping inside the internal surface is investigated. The motion of a rotating cylinder is considered uniformly accelerated, at constant velocity and uniformly decreasing until rotation stops sequentially. Stresses, reversible and irreversible strains, displacements are calculated; the stress relaxation after the stop of cylinder rotation is evaluated. The present problem is solved in the software complex developed on the base of the system of computer mathematics Scilab.

Ключевые слова: большие деформации, упругость, ползучесть, проскальзывание, релаксация напряжений.

Key words: large strains, elasticity, creep, slipping, stress relaxation.

УДК 004.942

Введение

Изменение формы некоторых конструкционных материалов осуществляется способом холодной формовки в условиях ползучести [7]. Этим вызван интерес к постановкам задач теории больших деформаций, когда при кинематическом воздействии на деформируемые материалы необратимые деформации накапливаются в условиях ползучести при низкой температуре. Здесь рассмотрим такой случай на примере задачи о вискозиметрическом деформировании несжимаемого материала, образующего слой между двумя жёсткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями, при условии возможного проскальзывания в окрестности внутренней жёсткой стенки.

Основные модельные соотношения

В настоящей работе для моделирования поведения среды используется теория больших упругопластических деформаций, в которой разделение деформаций на обратимую и необратимую составляющие определяется дифференциальными уравнениями изменения (переноса) [4; 5].

В прямоугольной системе пространственных декартовых координат Эйлера x_i кинематика среды определяется соотношениями

$$\begin{aligned} d_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} - u_{k,i}u_{k,j}) = e_{ij} + p_{ij} - \frac{1}{2}e_{ik}e_{kj} - e_{ik}p_{jk} - p_{ik}e_{jk} + e_{ik}p_{mk}e_{jm}, \\ \frac{De_{ij}}{Dt} &= \varepsilon_{ij} - \gamma_{ij} - \frac{1}{2}[(\varepsilon_{ik} - \gamma_{ik} + z_{ik})e_{kj} + e_{ik}(\varepsilon_{kj} - \gamma_{kj} - z_{kj})], \\ \frac{Dp_{ij}}{Dt} &= \gamma_{ij} - p_{ik}\gamma_{kj} - \gamma_{ik}p_{kj}, \quad \frac{Dn_{ij}}{Dt} = \frac{dn_{ij}}{dt} - r_{ik}n_{kj} + n_{ik}r_{kj}, \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}), \quad \omega_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} - v_{j,i}), \quad v_i = \frac{du_i}{dt} = \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_{i,j}v_j, \quad u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (1)$$

где d_{ij} – компоненты тензора деформаций Альманси; u_i – компоненты вектора перемещений точек среды; e_{ij} и p_{ij} – обратимая (упругая) и необратимая составляющие d_{ij} соответственно; $\frac{Dn_{ij}}{Dt}$ – оператор используемой объективной производной произвольного тензора n_{ij} по времени; ε_{ij} и γ_{ij} – компоненты тензоров скоростей полных и необратимых деформаций соответственно; ω_{ij} – косо-симметричный тензор вихря скорости; v_i – компоненты вектора скорости точек среды, а r_{ij} – тензор вращений, который вместе со своей нелинейной составляющей z_{ij} определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} r_{ij} &= \omega_{ij} + z_{ij}, \quad z_{ij} = A^{-1} \left[(\varepsilon_{im}e_{mj} - e_{im}\varepsilon_{mj})B^2 + B(\varepsilon_{im}e_{mn}e_{nj} - e_{im}e_{mn}\varepsilon_{nj}) + e_{im}\varepsilon_{mn}e_{nk}e_{kj} - e_{im}e_{mn}\varepsilon_{nk}e_{kj} \right], \\ A &= 8 - 8E_1 + 3E_1^2 - E_2 - \frac{1}{3}E_1^3 + \frac{1}{3}E_3, \quad B = 2 - E_1, \quad E_1 = e_{kk}, \quad E_2 = e_{ij}e_{ji}, \quad E_3 = e_{ij}e_{jk}e_{ki}. \end{aligned} \quad (2)$$

Когда $\gamma_{ij} = 0$, компоненты p_{ij} изменяются так же, как при повороте системы координат, или как при движении среды без деформирования, то есть $\frac{Dp_{ij}}{Dt} = 0$. При $z_{ij} = 0$ производная в (1) переходит в производную Яумана.

Полагаем, что термодинамический потенциал (плотность распределения свободной энергии) является изотропной функцией только обратимых деформаций. В таком случае, следуя закону сохранения энергии, напряжения в среде однозначно определяются обратимыми деформациями и связаны с ними зависимостью, аналогичной формуле Мурнагана, известной в нелинейной теории упругости [6]. Запишем такую зависимость для несжимаемой среды:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \frac{\partial W}{\partial e_{ik}}(\delta_{kj} - e_{kj}), \quad (3)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений Эйлера – Коши; p – добавочное гидростатическое давление; W – упругий потенциал, задаваемый для изотропной среды в следующем виде:

$$\begin{aligned} W &= -2\mu I_1 - \mu I_2 + bI_1^2 + (b - \mu)I_1 I_2 - \chi I_1^3 + \dots, \\ I_1 &= e_{kk} - \frac{1}{2}e_{ij}e_{ji}, \quad I_2 = e_{ik}e_{ki} - e_{ij}e_{jk}e_{ki} + \frac{1}{4}e_{ij}e_{jk}e_{kl}e_{li}, \end{aligned} \quad (4)$$

где μ – модуль сдвига, присущий материалу; b, χ – упругие константы высшего порядка. Диссипативный механизм деформирования, определяющий накопление необратимых деформаций, связан с реологическими и пластическими свойствами материала.

Далее полагаем, что необратимые деформации связаны со свойством ползучести материала и накапливаются с начала деформационного процесса, а пластическое течение в ходе деформирования не наблюдается. Чтобы задать соответствующий диссипативный механизм, выберем термодинамический потенциал $V(\sigma_{ij})$ в форме степенного закона ползучести Нортона [8]:

$$V(\sigma_{ij}) = B\Sigma^n(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3), \quad \Sigma = \max|\sigma_i - \sigma_j|, \quad \gamma_{ij} = \varepsilon_{ij}^v = \frac{\partial V}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (5)$$

где B, n – параметры ползучести материала; σ_k – главные значения тензора напряжений; ε_{ij}^v – тензор скоростей деформаций ползучести. Учитывая, что возникновение и развитие пластического течения в материале не рассматривается, напряжённое состояние в таком случае не должно достигать поверхности нагружения. Принимая в качестве таковой условие пластичности максимального касательного напряжения, получим, что в течение рассматриваемого процесса деформирования должно быть справедливо неравенство $\max|\sigma_i - \sigma_j| < 2k$, где k – предел текучести материала.

Постановка задачи, поворот внешнего цилиндра

Рассмотрим деформирование несжимаемого материала, составляющего слой между двумя жёсткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями при повороте одной из них с переменной скоростью, тогда как другая остаётся неподвижной.

Пусть для определённости вращается внешний цилиндр радиуса $r = R$, а внутренняя поверхность радиуса $r = r_0$ неподвижна.

Для решения задачи будем использовать цилиндрическую систему координат (r, φ, z) . Считая, что все точки среды движутся по окружностям, определим кинематику среды согласно (1) следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} u_r &= r(1 - \cos\theta), \quad u_\varphi = r \sin\theta, \quad d_{rr} = -\frac{1}{2}\left(r \frac{\partial\theta}{\partial r}\right)^2, \quad d_{r\varphi} = \frac{1}{2}r \frac{\partial\theta}{\partial r}, \\ v_\varphi &= r \frac{\partial\theta}{\partial t} = rw, \quad \varepsilon_{r\varphi} = \frac{1}{2}r \frac{\partial^2\theta}{\partial r \partial t} = \varepsilon_{r\varphi}^e + \varepsilon_{r\varphi}^v, \quad \omega_{r\varphi} = -\varepsilon_{r\varphi} - \frac{\partial\theta}{\partial t}, \quad r_{\varphi r} = \frac{\partial\theta}{\partial t} + \frac{2\varepsilon_{r\varphi}(e_{\varphi\varphi} - 1)}{e_{rr} + e_{\varphi\varphi} - 2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\theta = \theta(r, t)$ – центральный угол закручивания; ε_{ij}^e – компоненты тензора скоростей обратимых деформаций. Скорость вращения внешнего цилиндра $w_R(t)$ зададим последовательно возрастающей, постоянной, убывающей и нулевой:

$$w_R(t) = \begin{cases} \alpha^2 t, & 0 \leq t \leq t_1, \\ \alpha^2 t_1, & t_1 \leq t \leq t_2, \\ \alpha^2 t_1 - \beta^2 (t - t_2), & t_2 \leq t \leq t_3, \\ 0, & t_3 \leq t, \end{cases} \quad (7)$$

где α, β – задаваемые константы; t_k – некоторые моменты времени.

На цилиндрических стенках выполняются условия прилипания, а напряжённое состояние вызывается начальным поджатием, поэтому граничные условия запишем в виде

$$\bar{u}|_{r=r_0} = \bar{v}|_{r=r_0} = 0, \quad \theta|_{r=R} = \theta_R(t) = \int_0^t w_R(\xi) d\xi, \quad \sigma_{rr}|_{r=r_0} = \sigma_0. \quad (8)$$

В качестве начальных условий выступает отсутствие деформаций и напряжений в начале деформирования.

Контакт материала с жёсткими стенками при $r = r_0$ и $r = R$ первоначально осуществляется согласно закону сухого трения [2]:

$$|\sigma_{r\varphi}| \leq \gamma |\sigma_{rr}|, \quad (9)$$

где γ – коэффициент трения покоя. Диагональные компоненты тензоров деформаций в задачах данного класса [2; 3] являются малыми более высокого порядка по сравнению с недиагональными. Поэтому далее будем пренебрегать слагаемыми выше первого порядка по диагональным компонентам тензоров деформаций и выше второго – по недиагональным, что позволяет значительно облегчить последующие аналитический и вычислительный процессы. Тогда согласно (3) и (4) компоненты тензора напряжений можно определить в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= -p - 2\mu + 2(b + \mu)e_{rr} + 2be_{\varphi\varphi} + \mu e_{r\varphi}^2, \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= -p - 2\mu + 2(b + \mu)e_{\varphi\varphi} + 2be_{rr} + \mu e_{r\varphi}^2, \\ \sigma_{zz} &= -p - 2\mu + 2b(e_{rr} + e_{\varphi\varphi}) - 2\mu e_{r\varphi}^2, \\ \sigma_{r\varphi} &= 2\mu e_{r\varphi}, \end{aligned} \quad (10)$$

откуда

$$\frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{\sigma_{r\varphi}} = \frac{e_{rr} - e_{\varphi\varphi}}{e_{r\varphi}}. \quad (11)$$

Пренебрегая силами инерции, уравнения равновесия можно записать в форме

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} = \frac{\sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{rr}}{r}, \quad \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial r} = -2 \frac{\sigma_{r\varphi}}{r}. \quad (12)$$

Интегрирование последнего соотношения с учётом (10) приводит к следующим результатам:

$$\sigma_{r\varphi} = \frac{c(t)}{r^2}, \quad e_{r\varphi} = \frac{c(t)}{2\mu r^2}. \quad (13)$$

Потенциал $V(\sigma_{ij})$ в принятых выше ограничениях по компонентам тензоров деформаций имеет

$$\text{вид } V = B \left[(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi})^2 + 4\sigma_{r\varphi} \sigma_{\varphi r} \right]^{\frac{n}{2}}.$$

Тогда согласно (1), (5), (11) и (13) ненулевые компоненты тензора скоростей деформаций ползучести определяются соотношениями

$$\varepsilon_{r\varphi}^v = \frac{\partial p_{r\varphi}}{\partial t} = Bn2^{n-1} \frac{c^{n-1}(t)}{r^{2n-2}}, \quad \varepsilon_{rr}^v = \frac{e_{rr} - e_{\varphi\varphi}}{e_{r\varphi}} \frac{\varepsilon_{r\varphi}^v}{2} = -\varepsilon_{\varphi\varphi}^v. \quad (14)$$

Осуществляя подстановку (13) и (14) в уравнение связи тензоров скоростей деформаций (6) и интегрируя получившийся результат при граничных условиях (8), поставленных на поверхности $r = r_0$, выведем дифференциальные уравнения для угла поворота:

$$\theta(r, t) = \frac{c(t)}{2\mu} \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r^2} \right) + \frac{Bn2^{n-1}}{n-1} c_1(t) \left(\frac{1}{r_0^{2n-2}} - \frac{1}{r^{2n-2}} \right), \quad (15)$$

где

$$c_1(t) = \int_0^t c^{n-1}(\xi) d\xi. \quad (16)$$

Используя граничные условия (8) на внешней цилиндрической поверхности, из (15) и (16) нетрудно получить уравнения для неизвестных функций $c(t)$ и $c_1(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{c}(t) &= \frac{2\mu w_R(t)}{r_0^{-2} - R^{-2}} - \frac{\mu Bn2^n}{n-1} c^{n-1}(t) \cdot \frac{r_0^{2-2n} - R^{2-2n}}{r_0^{-2} - R^{-2}}, & c(0) &= 0, \\ \dot{c}_1^{n-1}(t) &= \frac{2\mu\theta_R(t)}{r_0^{-2} - R^{-2}} - \frac{\mu Bn2^n}{n-1} c_1(t) \cdot \frac{r_0^{2-2n} - R^{2-2n}}{r_0^{-2} - R^{-2}}, & c_1(0) &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Известные численные распределения данных функций позволяют определить компоненты тензоров деформаций $e_{r\varphi}$ и $p_{r\varphi}$ с помощью (13) и (14) соответственно. Оставшиеся компоненты могут быть рассчитаны с использованием зависимостей, основанных на (1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{\varphi\varphi}(r, t)}{\partial t} &= \varepsilon_{r\varphi}^v \frac{e_{r\varphi}^2 - p_{\varphi\varphi}}{e_{r\varphi}} + \frac{4p_{r\varphi}\varepsilon_{r\varphi}}{e_{r\varphi}^2 + 2} \left(1 + p_{\varphi\varphi} - \frac{1}{2}e_{r\varphi}^2 - 2e_{r\varphi}p_{r\varphi} \right), \\ p_{rr} &= -p_{\varphi\varphi} - 2p_{r\varphi}^2, \quad e_{rr} = p_{\varphi\varphi} - \frac{3}{2}e_{r\varphi}^2 - 2e_{r\varphi}p_{r\varphi}, \quad e_{\varphi\varphi} = -e_{rr} - e_{r\varphi}^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Для отыскания диагональных компонент тензора напряжений требуется сначала определить σ_{rr} путём решения первого уравнения равновесия (12) при условии (8), после чего осуществить последовательный поиск гидростатического давления p , а затем и самих напряжений посредством (10).

Проскальзывание в окрестности внутреннего цилиндра

Уравнения (15) и (17) справедливы при выполнении неравенства (9), однако с ростом напряжённого состояния в материале в некоторый момент времени t_s в окрестности поверхности $r = r_0$ неравенство обратится в равенство. В таком случае при $t \geq t_s$ должно быть поставлено новое граничное условие при $r = r_0$:

$$|\sigma_{r\varphi}(r_0, t)| = \gamma |\sigma_{rr}(r_0, t)| + \xi w(r_0, t), \quad (19)$$

где ξ – постоянная вязкого трения; $w(r_0, t)$ – угловая скорость точек среды в окрестности $r = r_0$, а коэффициент γ выбирается таким образом, что $\gamma|\sigma_0| < k$, так как пластическое течение отсутствует согласно постановке задачи. Полагаем при этом увеличение напряжений таким, чтобы проскальзывание не происходило в окрестности $r = R$.

Смена граничного условия приведёт к изменению дифференциального уравнения для функции $c(t)$.

Так, применяя к (6) граничное условие (8), заданное на $r = R$, получим формулу для вычисления угла поворота:

$$\theta(r, t) = \theta_R(t) - \frac{c(t)}{2\mu} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) - \frac{Bn2^{n-1}}{n-1} c_1(t) \left(\frac{1}{r^{2n-2}} - \frac{1}{R^{2n-2}} \right), \quad (20)$$

откуда при дифференцировании по t получим уравнение для скоростей точек цилиндрического слоя:

$$w(r, t) = w_R(t) - \frac{\dot{c}(t)}{2\mu} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) - \frac{Bn2^{n-1}}{n-1} c^{n-1}(t) \left(\frac{1}{r^{2n-2}} - \frac{1}{R^{2n-2}} \right). \quad (21)$$

Подставляя полученный результат при $r = r_0$ в уравнение (19), найдём новое дифференциальное уравнение для функции $c(t)$:

$$\dot{c}(t) = \frac{2\mu}{r_0^{-2} - R^{-2}} \left[\frac{\gamma|\sigma_0|}{\xi} - \frac{c(t)}{\xi r_0^2} + w_R(t) \right] - \frac{\mu Bn2^n}{n-1} c^{n-1}(t) \frac{r_0^{2-2n} - R^{2-2n}}{r_0^{-2} - R^{-2}}. \quad (22)$$

В качестве начального условия для (22) используется значение $c(t_s)$, вычисленное согласно (17). Функция $c_1(t)$ наиболее просто может быть численно определена здесь с помощью (16). Смена граничного условия не отражается на зависимостях, позволяющих определять компоненты тензоров деформаций (13), (14), (18) и напряжений (10), (12). Уравнения (19)–(22) действуют при $t_s \leq t \leq t_a$, где t_a – некоторый момент времени, когда неравенство (9) станет снова справедливым. При $t \geq t_a$ для определения функций $c(t)$ и $c_1(t)$ станут действительны уравнения (17), подлежащие решению при начальных условиях $c(t_a)$ и $c_1(t_a)$, найденных из (16) и (22).

Результаты решения задачи

Решение представленной задачи осуществлено в программном комплексе, разработанном на базе свободно распространяемой системы компьютерной математики Scilab [1].

Расчёт проведён в безразмерных переменных $\tau = \alpha t$ и $\tilde{r} = r/R$ при следующих заданных параметрах:

$$B = 3,5, \quad n = 3, \quad \frac{k}{\mu} \approx 0,00245, \quad \frac{b}{\mu} = 4, \quad \frac{\alpha}{\beta} = 3, \quad \frac{r_0}{R} = 0,5, \quad \frac{\xi\alpha}{\mu} = 0,01, \quad \frac{\gamma|\sigma_0|}{\mu} \approx 0,00046. \quad (23)$$

Графические результаты решения задачи представлены ниже.

На рис. 1 показано распределение угла поворота $\theta(r, t)$ в моменты времени τ_1, τ_2, τ_3 и $\tau_4 = 30\tau_3$ (спустя длительный промежуток времени после остановки вращения внешнего цилиндра).

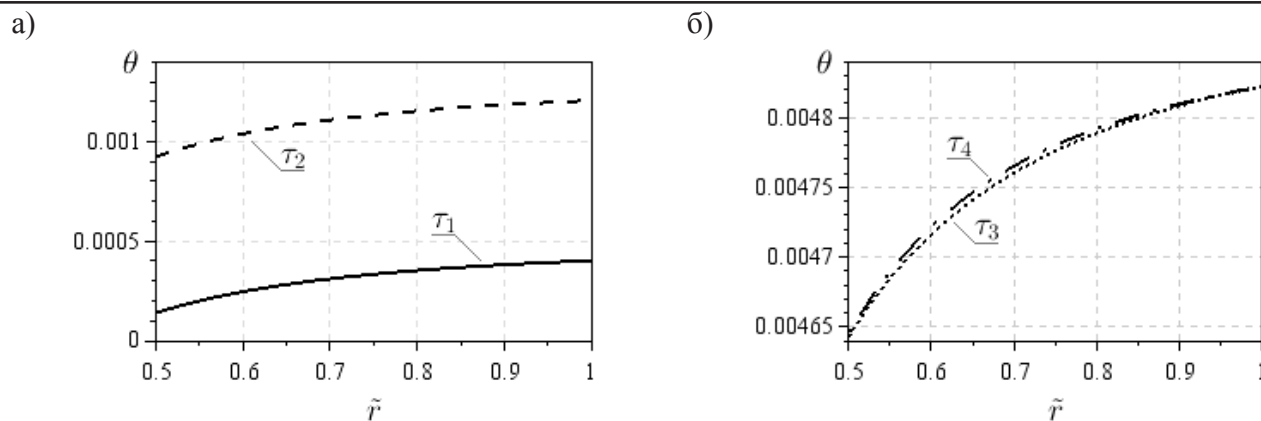


Рис. 1. Угол поворота $\theta(\tilde{r}, \tau)$: а – при $\tau = \tau_1$ и $\tau = \tau_2$; б – при $\tau = \tau_3$ и $\tau = \tau_4$

Изменения компонент тензора необратимых деформаций со временем у поверхности внутреннего цилиндра можно проследить на рис. 2.

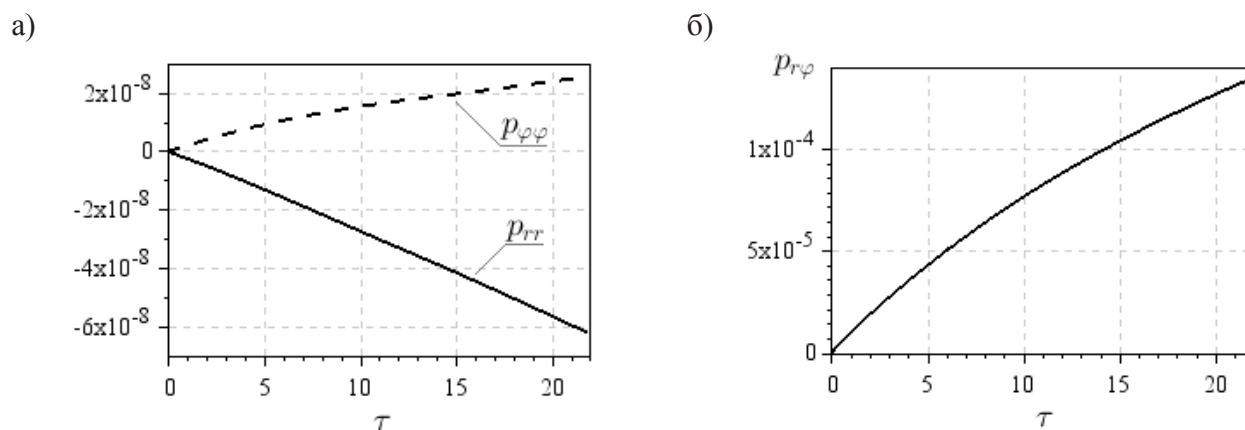


Рис. 2. Деформации ползучести при $r = r_0$:

а – диагональные компоненты p_{rr} и $p_{\varphi\varphi}$; б – недиагональная компонента $p_{r\varphi}$

Релаксация компонент $\sigma_{r\varphi}$ и наибольшей из диагональных по абсолютной величине $\sigma_{\varphi\varphi}$ тензора напряжений, проявляющаяся в снижении уровня напряжений после остановки вращающейся поверхности, показана на рис. 3.

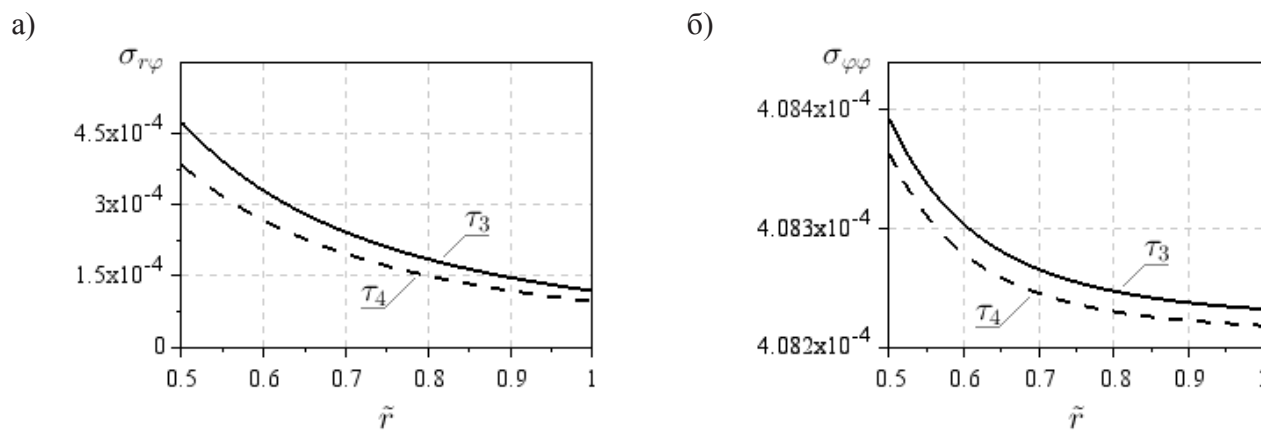


Рис. 3. Релаксация напряжений: а – компоненты $\sigma_{r\varphi}$; б – компоненты $\sigma_{\varphi\varphi}$

Вращение внутреннего цилиндра

Рассмотрим теперь вариант задачи, при котором деформирование материала происходит при вращении внутреннего цилиндра радиуса $r = r_0$ и неподвижности внешней поверхности радиуса $r = R$. Кинематика среды в таком случае определяется, как и ранее, зависимостями (6). Скорость вращения внутреннего цилиндра зададим аналогично предыдущему варианту:

$$w_{r_0}(t) = \begin{cases} \alpha^2 t, & 0 \leq t \leq t_1, \\ \alpha^2 t_1, & t_1 \leq t \leq t_2, \\ \alpha^2 t_1 - \beta^2 (t - t_2), & t_2 \leq t \leq t_3, \\ 0, & t_3 \leq t. \end{cases} \quad (24)$$

Граничные условия в рассматриваемом случае принимают следующий вид:

$$\bar{u}|_{r=R} = \bar{v}|_{r=R} = 0, \quad \theta|_{r=r_0} = \theta_{r_0}(t) = \int_0^t w_{r_0}(\xi) d\xi, \quad \sigma_{rr}|_{r=r_0} = \sigma_0. \quad (25)$$

Соотношения (9)–(12), (16) и (18) при смене вращающейся поверхности не изменяются и действительны в рамках новой задачи. Однако некоторые входящие в них компоненты, а также дифференциальные уравнения для функций $c(t)$ и $c_1(t)$ будут отличаться от построенных выше.

Так, при интегрировании второго уравнения равновесия (12) получим

$$\sigma_{r\varphi} = -\frac{c(t)}{r^2}, \quad e_{r\varphi} = -\frac{c(t)}{2\mu r^2}. \quad (26)$$

Отсюда для компоненты $\varepsilon_{r\varphi}^v$ тензора скоростей деформаций ползучести справедливо следующее соотношение:

$$\varepsilon_{r\varphi}^v = \frac{\partial p_{r\varphi}}{\partial t} = -Bn2^{n-1} \frac{c^{n-1}(t)}{r^{2n-2}}. \quad (27)$$

Аналогично зависимостям (15) и (17) в рассматриваемом случае получим уравнения для угла поворота

$$\theta(r, t) = \frac{c(t)}{2\mu} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) + \frac{Bn2^{n-1}}{n-1} c_1(t) \left(\frac{1}{r^{2n-2}} - \frac{1}{R^{2n-2}} \right) \quad (28)$$

и функций $c(t)$ и $c_1(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{c}(t) &= \frac{2\mu w_{r_0}(t)}{r_0^{-2} - R^{-2}} - \frac{\mu Bn2^n}{n-1} c^{n-1}(t) \cdot \frac{r_0^{2-2n} - R^{2-2n}}{r_0^{-2} - R^{-2}}, \\ \dot{c}_1^{n-1}(t) &= \frac{2\mu \theta_{r_0}(t)}{r_0^{-2} - R^{-2}} - \frac{\mu Bn2^n}{n-1} c_1(t) \cdot \frac{r_0^{2-2n} - R^{2-2n}}{r_0^{-2} - R^{-2}}. \end{aligned} \quad (29)$$

Пусть в некоторый момент времени t_s в окрестности $r = r_0$ неравенство (9) перестанет быть справедливым. Тогда новое граничное условие

$$|\sigma_{r\varphi}(r_0, t)| = \gamma |\sigma_{rr}(r_0, t)| + \xi \langle w \rangle, \quad \langle w \rangle = w_{r_0}(t) - w(r_0, t), \quad (30)$$

поставленное при $r = r_0$, приведёт к новому дифференциальному уравнению для функции $c(t)$ при $t_s \leq t \leq t_a$. Для получения такого уравнения сначала сформулируем определение угла поворота на основе (6) и (25), а затем и для угловой скорости точки среды:

$$\begin{aligned} \theta(r, t) &= \frac{c(t)}{2\mu} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) + \frac{Bn2^{n-1}}{n-1} c_1(t) \left(\frac{1}{r^{2n-2}} - \frac{1}{R^{2n-2}} \right), \\ w(r, t) &= \frac{\dot{c}(t)}{2\mu} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) + \frac{Bn2^{n-1}}{n-1} c^{n-1}(t) \left(\frac{1}{r^{2n-2}} - \frac{1}{R^{2n-2}} \right). \end{aligned} \quad (31)$$

Тогда из (30) следует, что

$$\dot{c}(t) = \frac{2\mu}{r_0^{-2} - R^{-2}} \cdot \left[\frac{\gamma|\sigma_0|}{\xi} - \frac{c(t)}{\xi r_0^2} + w_{r_0}(t) \right] - \frac{\mu Bn2^n}{n-1} c^{n-1}(t) \frac{r_0^{2-2n} - R^{2-2n}}{r_0^{-2} - R^{-2}}. \quad (32)$$

Начальным условием для (32) служит величина $c(t_s)$, найденная при решении (29). При $t \geq t_a$ функции $c(t)$ и $c_1(t)$ определяются решением уравнений (29) при начальном условии $c(t_a)$ и $c_1(t_a)$, вычисленных согласно (16) и (32).

Результаты расчёта задачи о вращении внутренней цилиндрической поверхности, проведённого, как и ранее, в безразмерных переменных при значениях параметров (23), представлены ниже.

На рис. 4 показано изменение угла поворота точек среды при $\tau = \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$.

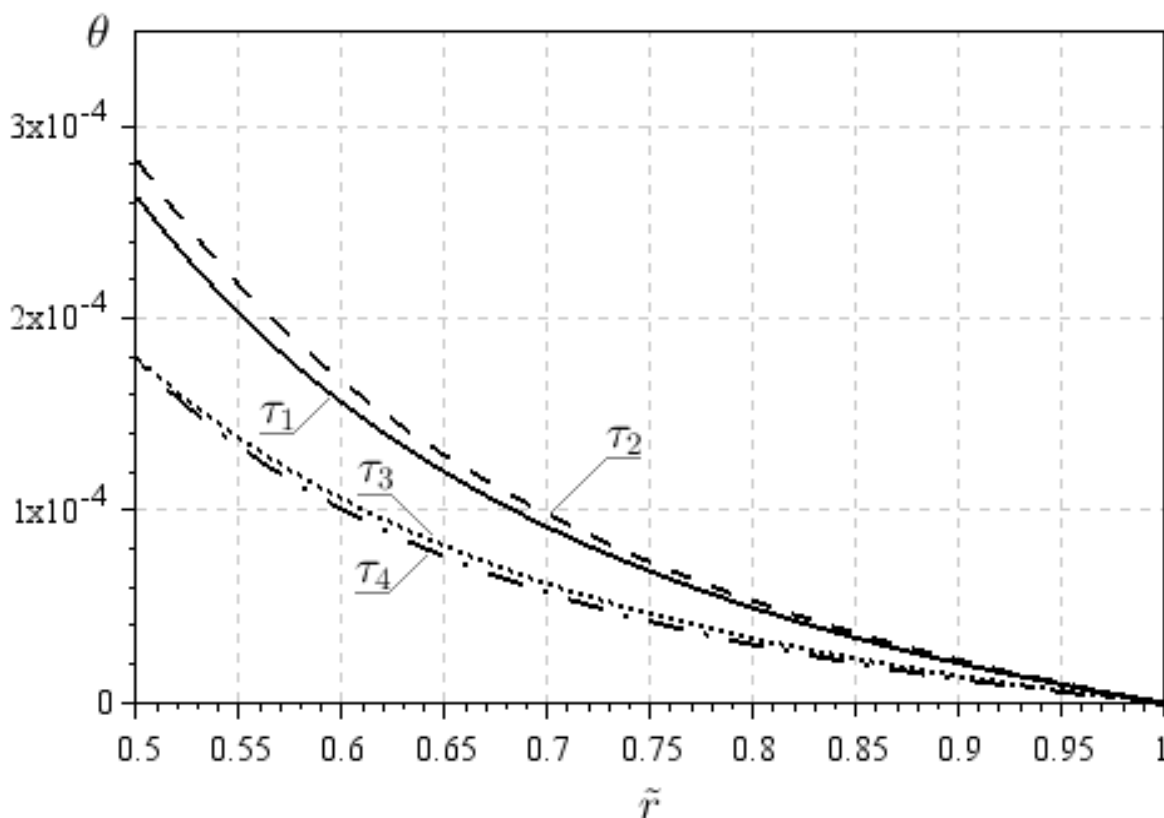


Рис. 4. Угол поворота $\theta(r, t)$

На рис. 5 проиллюстрировано изменение необратимых деформаций в ходе рассмотренного процесса в окрестности внутреннего цилиндра.

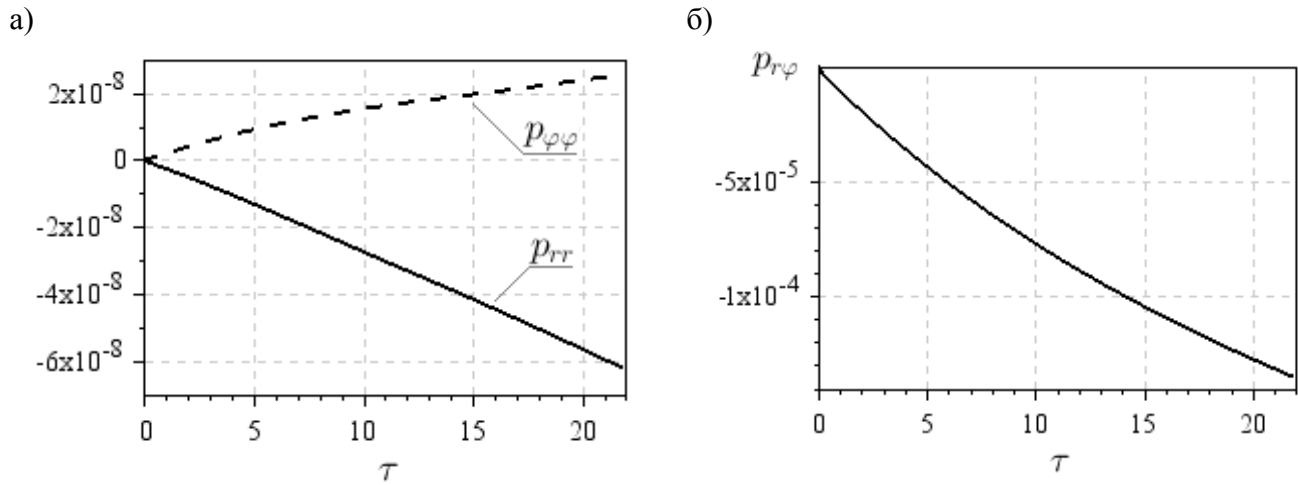


Рис. 5. Деформации ползучести при $r = r_0$:

а – диагональные компоненты p_{rr} и $p_{\phi\phi}$; б – недиагональная компонента $p_{r\phi}$

Снижение уровня напряжений в течение длительного периода времени отражено на рис. 6.

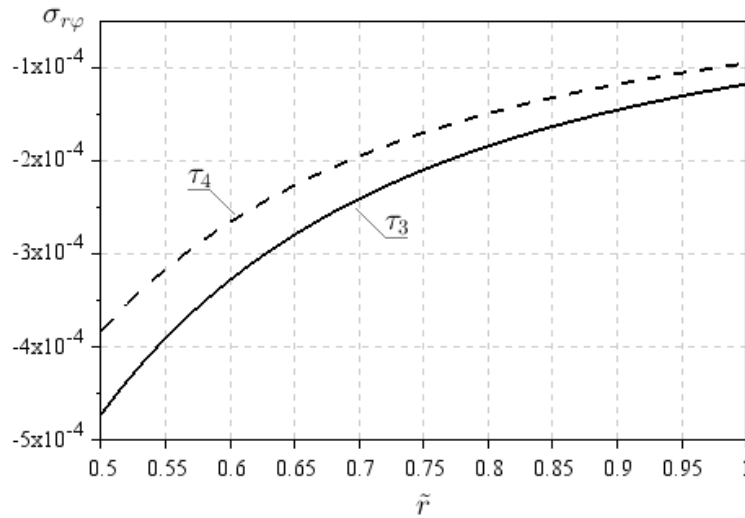


Рис. 6. Релаксация напряжений

Заключение

В рамках теории больших деформаций получено решение задачи о деформировании материала с нелинейными упругими и вязкими свойствами, находящегося в зазоре между двумя жёсткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями при ротационном движении одной из жёстких поверхностей, в то время как вторая остаётся неподвижной. Изучено равноускоренное движение вращающегося цилиндра, последующие его движения с постоянной скоростью и дальнейшее равнозамедленное движение до остановки. Решения получены при условиях, когда в окрестности внутреннего жёсткого цилиндра возможно проскальзывание материала. Для случаев поворота внешней, а затем внутренней поверхностей рассчитаны напряжения, обратимые и необратимые деформации, перемещения; исследована релаксация напряжений после полной остановки цилиндра.



ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, Е. Р. Scilab: решение инженерных и математических задач / Е. Р. Алексеев, Е. А. Рудченко, О. В. Чеснокова. – М.: ALT Linux; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 269 с.
2. Бегун, А. С. Течение упруговязкопластического материала между вращающимися цилиндрическими поверхностями в условиях нежёсткого сцепления / А. С. Бегун, А. А. Буренин, Л. В. Ковтанюк // Прикладная механика и техническая физика. – 2015. – Т. 56, № 2. – С. 146-158.
3. Бегун, А. С. Ползучесть и релаксация напряжений в материале цилиндрического слоя при его ротационном движении / А. С. Бегун, Л. В. Ковтанюк, А. О. Лемза // Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И. Я. Яковлева. Механика предельного состояния. – 2016. – № 4(30). – С. 3-11.
4. Буренин, А. А. Об одной простой модели для упругопластической среды при конечных деформациях / А. А. Буренин, Г. И. Быковцев, Л. В. Ковтанюк // Доклады Академии наук. – 1996. – Т. 347. – № 2. – С. 199-201.
5. Буренин, А. А. Большие необратимые деформации и упругое последствие / А. А. Буренин, Л. В. Ковтанюк. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 312 с.
6. Лурье, А. И. Нелинейная теория упругости / А. И. Лурье. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
7. Олейников, А. И. Интегрированное проектирование процессов изготовления монолитных панелей / А. И. Олейников, А. И. Пекарш. – М.: Эком, 2009. – 112 с.
8. Norton, Frederick H. The creep of steel at high temperatures / H. Norton, Frederick. – Y.: McGraw Hill Book Company, 1929. – 110 p.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Ситамов Э. С., Мокрицкий Б. Я., Гудим А. С.
E. S. Sitamov, B. Ya. Mokritskii, A. S. Gudim

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ РЕЖУЩЕЙ ПЛАСТИНЫ
ПРОХОДНОГО ТОКАРНОГО РЕЗЦА НА ЕЁ ПЕРИОД ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
ПРИ ОБРАБОТКЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ**

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE CUTTING
PLATE OF THE TURNING TOOL ON ITS WEAR RESISTANCE PERIOD
WHEN PROCESSING STAINLESS STEEL**

Ситамов Эрадж Сикандарович – аспирант кафедры технологии машиностроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: + 7 (924) 401-01-27. E-mail: eraj2303@mail.ru.

Mr. Eraj S. Sitamov – a post-graduate student Department of engineering technology of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: + 7 (924) 401-01-27. E-mail: eraj2303@mail.ru.

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: boris@knastu.ru.

Mr. Boris Ya. Mokritskii – doctor of technical Sciences, Professor of the Department of mechanical engineering of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: boris@knastu.ru.

Гудим Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Mr. Alexander S. Gudim – candidate of technical Sciences, associate Professor, associate Professor of electric drive and automation of industrial plants of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Аннотация. Выбор и приобретение рациональной формы инструментального материала металлорежущего инструмента для обработки нержавеющей сталей затруднён в силу того, что каталоги содержат усреднённую информацию без конкретизации марки нержавеющей стали. Приведены результаты сравнительной оценки износостойкости некоторых форм твёрдосплавных инструментальных материалов применительно к токарной обработке специализированной нержавеющей стали марки 09X17N7Ю, зарубежных аналогов которой нет.

Summary. The selection and acquisition of a rational form of the tool material of metal-cutting tools for the treatment of stainless steels is difficult because the catalogs contain averaged information without specifying the grade of stainless steel. The results of a comparative assessment of the wear resistance of some forms of carbide tool materials in relation to the turning of specialized stainless steel 09N17N7Yu, which has no foreign analogues, are presented.

Ключевые слова: квадратная, ромбическая, трёхгранная, пятигранная формы режущей пластины.

Key words: square, rhombic, triangular, pentagonal shape of the cutting plate.

УДК 621.9

Введение

Труднообрабатываемая [1] вязкая и склонная к образованию сливной стружки нержавеющей специализированная сталь марки 09X17N7Ю (используется в судостроении, химической и нефтегазовой отраслях) требует серьёзного внимания [2] при выборе марки инструментального

материала. Ещё сложнее для таких условий эксплуатации выбрать геометрическую форму режущей пластины. От того, насколько рационально она выбрана, зависит период её износостойкости, эффективность стружкодробления, степень повреждения режущих кромок пластины стружкой и так далее. В статье приведены результаты применения режущих пластин разной формы.

Обсуждение результатов

На рис. 1 условно показаны в рабочем положении несколько сменных режущих пластин различной формы для того, чтобы была возможность визуально оценить их угол в плане.

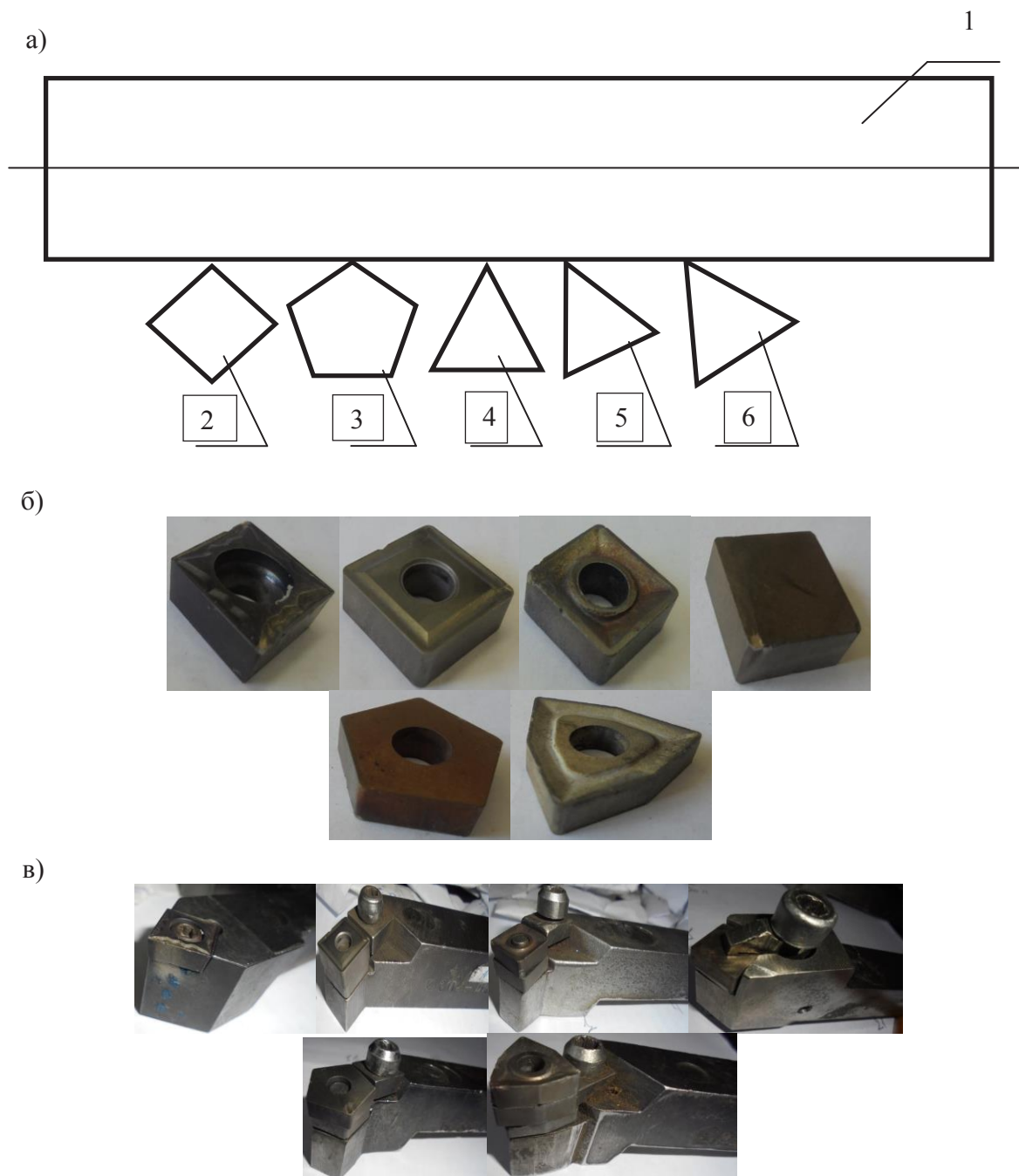


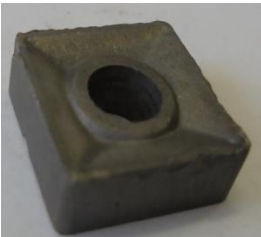





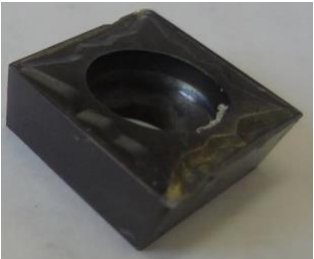


Рис. 1. Примеры режущих пластин разной формы: а – условная схема расположения пластин при продольной токарной наружной обработке (1 – обрабатываемая заготовка; 2 – квадратная пластина; 3 – пятигранная пластина; 4, 5, 6 – пластины треугольной формы, установленные в разное положение по отношению к обрабатываемой поверхности заготовки 1); б – примеры фактических пластин; в – примеры установки пластин в корпус резца

Проведены сравнительные испытания износостойкости таких пластин при относительно идентичных условиях эксплуатации. Под износостойкостью здесь понимается время работы пластины до достижения некоторой величины износа по задней поверхности, эта величина принята равной 0,5 мм. Идентичность условий эксплуатации в полной мере обеспечить не удавалось, но параметры режима резания во всех случаях были одинаковы (скорость резания 50...55 м/мин, подача 0,21 мм/об. заг., глубина резания 1 мм). Передний угол при резании у разных пластин отличался не принципиально. Марка используемого инструментального материала во всех случаях была ВК8. Запись сил резания здесь не анализируется.

В табл. 1 приведены полученные результаты для отдельных пластин.

Таблица 1

Сведения об отдельных используемых пластинах

Сведения о режущей пластине, её фото	Период износостойкости, мин	Характер износа по задней поверхности	Пример стружки, формировавшейся при заданных условиях эксплуатации
<p>1. Квадратная пластина с центральным отверстием (диаметр описывающей окружности 17,5 мм)</p> 	<p>45</p>		
<p>2. Пятигранная пластина без стружкозавивающей канавки</p> 	<p>100</p>		
<p>3. Ромбическая пластина с двумя режущими кромками CCMT 120404 – HMP Корея KORLOY. Inc</p> 	<p>90</p>		

Продолжение таблицы 1

Сведения о режущей пластине, её фото	Период износостойкости, мин	Характер износа по задней поверхности	Пример стружки, формировавшейся при заданных условиях эксплуатации
<p>4. Треугольная (с ломаными линиями сторон) пластина (диаметр описывающей окружности 21,5 мм)</p> 	17		
<p>5. Квадратная пластина двусторонняя (диаметр описывающей окружности 21,5 мм)</p> 	65		

В результате проведённых исследований сформулированы следующие выводы:

1. Несущественное различие (строки 1, 2 и 3 табл. 1) в размерах и форме пластин средней размерности (диаметр описывающей окружности 16,5...18 мм) влечёт за собой существенное различие в периоде износостойкости, характере износа режущей пластины. При этом предпочтительна пятигранная форма пластины. Незначительно, но уступает ромбическая форма (строка 3 табл. 1). Тип образующейся стружки схож.

2. Для пластин большей размерности (диаметр описывающей окружности 21,5 мм) форма пластины существенно определяет её период износостойкости (строки 4 и 5 табл. 1), при этом предпочтительна четырёхгранная квадратная форма.

3. На данном этапе работы нет возможности квалифицированно объяснить преимущество режущей пластины той или иной формы, но приведённые сведения могут быть использованы в качестве рекомендации.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. – Введ. 1975-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 37 с.
- Мокрицкий, Б. Я. Упрочнение сложносоставными покрытиями режущих пластин для обработки коррозионностойкой стали 09X17H7Ю / Б. Я. Мокрицкий, А. А. Верещака, С. В. Белых, Е. Б. Мокрицкая // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 5. – С. 3-6.

Лановой Д.А., Свинин В.М., Савилов А.В.

ПОДАВЛЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА СТАНКЕ С ЧПУ МЕТОДОМ ПРОГРАММНОЙ МОДУЛЯЦИИ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ

Лановой Д. А., Свинин В. М., Савилов А. В.

D. A. Lanovoy, V. M. Svinin, A. V. Savilov

ПОДАВЛЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА СТАНКЕ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МЕТОДОМ ПРОГРАММНОЙ МОДУЛЯЦИИ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ

SELF-OSCILLATION SUPPRESSION BY THE CUTTING SPEED VARIATION METHOD WHEN END MILLING ON THE CNC MACHINE TOOL

Лановой Дмитрий Алексеевич – магистрант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств Института авиамашиностроения и транспорта Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск); 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: vault141@gmail.com.

Mr. Dmitriy A. Lanovoy – Master's Degree Student of the Department of Mechanical Engineering Production Institute of Aircraft Construction, Mechanical Engineering and Transport, Technologies and Equipment Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk region, Irkutsk, 83 Lermontov str. E-mail: vault141@gmail.com.

Свинин Валерий Михайлович – профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств Института авиамашиностроения и транспорта Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск); 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: svinin_vm@mail.ru.

Mr. Valeriy M. Svinin – professor of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment, Institute of Aircraft Construction, Mechanical Engineering and Transport, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk region, Irkutsk, 83 Lermontov str. E-mail: svinin_vm@mail.ru.

Савилов Андрей Владиславович – доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств Института авиамашиностроения и транспорта Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск); 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: saw@istu.edu.

Mr. Andrey V. Savilov – associated professor of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment, Institute of Aircraft Construction, Mechanical Engineering and Transport, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk region, Irkutsk, 83 Lermontov str. E-mail: saw@istu.edu.

Аннотация. В данной статье рассмотрена возможность подавления автоколебаний тонкостенной детали в процессе концевом фрезеровании методом модуляции скорости резания (изменения скорости шпинделя – Spindle Speed Variation (SSV)). Дано описание метода изменения скорости шпинделя при обработке. Представлены экспериментальные данные, характеризующие возможность станка с числовым программным управлением (ЧПУ) воспроизводить модуляцию скорости резания. Приведён сравнительный анализ резания как при постоянной частоте вращения, так и при изменении скорости шпинделя.

Summary. This paper discusses the possibility of the thin-walled part vibration suppression by the Spindle Speed Variation (SSV) method when end milling. The SSV method is described when machining. Experimental data, which show the CNC machine tool opportunity to realize the cutting speed variation, are presented. The analysis of the cutting process was conducted when cutting speed is constant and variable.

Ключевые слова: автоколебания, модуляция скорости резания, фрезерование, тонкостенная деталь.

Key words: chatter, spindle speed variation, milling, thin-walled part.

УДК 621.914

Введение

В современном машиностроении находят применение высокопроизводительные современные инструменты на станках с ЧПУ, которые позволяют добиваться высоких результатов обработки любых типов материалов. Несмотря на эти достижения, одной из главных проблем при механообработке являются регенеративные автоколебания. Данный вид вибраций ведёт к ухудшению качества обрабатываемой поверхности, снижает производительность и ускоряет износ как инструмента, так и шпинделя станка. При этом сам факт внедрения прогрессивных элементов технологической системы не способствует уменьшению вибраций, а в некоторых случаях даже приводит к их росту, обусловленному более высокой частотой вращения шпинделей современных обрабатывающих центров.

Для авиационной промышленности характерно фрезерование деталей, у которых есть элементы, представляющие собой тонкие стенки и полотно. Это обусловлено ограничением веса летательного аппарата. Тонкостенные структуры существенно варьируются в зависимости от эксплуатационного характера использования. Например, сложные тонкостенные конструкции, такие как лопатки турбин, используемые в силовых (тяговых) установках, или упрощённые тонкостенные компоненты, такие как направляющий клапан, расположенный в крыле самолёта, но, вероятно, самое большое использование тонкостенных конструкций имеет место в таких авиационных деталях, как нервюры и лонжероны (основные элементы каркаса). Данные конструкции должны быть оптимизированы при обработке, так как они состоят из глубоких карманов, которые ограничены тонкими стенками [10].

Фрезерование тонкостенных частей деталей связано с различными проблемами при обработке. Одной из них является прогиб стенки при циклической односторонней обработке, что приводит к геометрическим ошибкам и ухудшению качества поверхности. Другой рассматриваемой проблемой, возникающей во время обработки, являются самовозбуждающиеся колебания инструмента, а также механические колебания обрабатываемой детали.

При концевом фрезеровании тонкостенных деталей возникают вынужденные колебания, связанные с входом и выходом зуба фрезы на обрабатываемой части заготовки, и регенеративные, возникающие со срезанием стружки по волнистому следу на поверхности резания, полученному при предыдущем проходе зуба фрезы [1].

Во многих случаях приходится ограничивать режимы резания при этом типе обработки либо применять различные способы подавления автоколебаний. На данный момент существует достаточное количество способов подавления автоколебаний, реализуемых от конструкторского метода до программного.

Основным способом борьбы с вибрациями является увеличение жёсткости закрепления инструмента и обрабатываемой детали. Однако в некоторых случаях такой способ не даёт требуемых результатов ввиду высокой собственной податливости инструмента или детали. В некоторых случаях предлагается размещать на податливой детали демпфирующие устройства, функцией которых является рассеяние колебательной энергии системы. Однако данный способ не применим в случае необходимости гашения вибраций вращающегося инструмента или детали при её односторонней обработке (так как на поверхности может не остаться достаточно места для размещения демпфирующих устройств) [3].

В современном машиностроении применяются следующие наиболее сложные способы подавления автоколебаний при обработке:

- а) изменение шага режущих зубьев инструмента;
- б) изменение углов режущих кромок;
- в) применение математического моделирования или модального анализа, построение диаграмм устойчивого резания [6];
- г) установка в конструкцию станков датчиков активного гашения вибраций со следящими системами;
- д) модуляция скорости резания как при помощи механического воздействия, так и при программном обеспечении на станке с ЧПУ.

Последний способ является одним из новых направлений подавления регенеративных колебаний в заготовке при обработке. Он представляет собой периодическое изменение частоты вращения шпинделя во времени (Spindle Speed Variation – SSV). Эффективность этого способа гашения автоколебаний была подтверждена многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями отечественных и зарубежных учёных [2; 4; 7; 8; 9; 11; 12; 13], а также компаниями Siemens [14] и HaaS Automation [15]. К тому же данный метод по сравнению с другими способами наиболее экономически выгоден и прост в реализации.

Для массового применения этот метод ещё недостаточно изучен, в частности, отсутствуют рекомендации по выбору рациональных значений частоты и глубины модуляций. Поэтому изучение возможностей современных станков с ЧПУ для модуляции скорости резания и исследование её эффективности по подавлению автоколебаний представляет актуальную задачу современного машиностроения.

Таким образом, целью данной статьи является подавление автоколебаний при концевом фрезеровании на станке с ЧПУ методом модуляции скорости резания, а также анализ полученных результатов и их сравнение с постоянной скоростью обработки, сопровождающейся регенеративными колебаниями.

Данный способ подавления автоколебаний реализуется с помощью программного кода на станке с ЧПУ и работает по определённому закону. Как показано в работе [7], для подавления регенеративных колебаний необходимо принудительно сбивать фазу автоколебаний относительно вибрационного следа на поверхности резания. Для этого нужно, чтобы скорость резания на одном и том же участке детали при последующих проходах значительно различалась. При этом относительная частота модуляции скорости резания за один оборот заготовки или инструмента должна быть равна половине количества зубьев инструмента. К примеру, для двухперьевого сверла относительная частота модуляции должна равняться одной модуляции за оборот, а для концевой четырёхзубой фрезы – двум модуляциям за оборот (см. рис. 1).

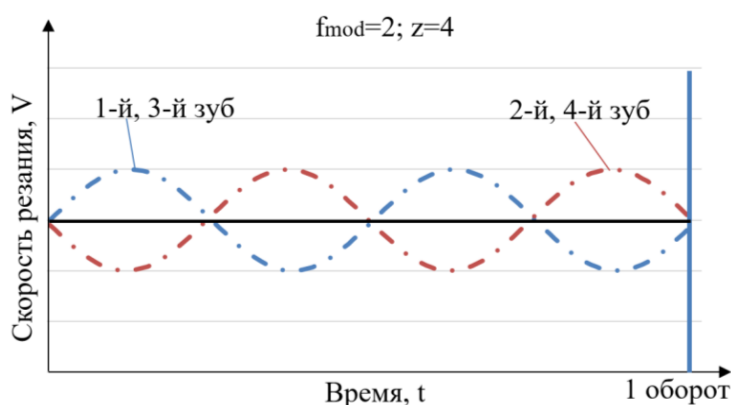


Рис. 1. Закон модулирования скорости резания при фрезеровании четырёхзубой фрезой при частоте модуляции (f_{mod}), равной двум

Современные станки уже имеют в системе управления ЧПУ данную функцию SSV. Для примера можно привести компанию HaaS [15]. Данные станки со встроенной модуляцией стоят намного дороже стандартных аналогов. Если же на станке встроенная функция SSV отсутствует, то её можно реализовать программно.

Исследователи из Японии [12] рассматривали концевое фрезерование с SSV как процесс, который должен компенсировать сопротивление резанию для достижения высоких частот вращения шпинделя. В данном случае они рассматривали изменение частоты вращения шпинделя по треугольному закону, модулируя и реализуя её на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ. Их исследование позволяет повысить производительность обработки с помощью разработанной си-



стемы управления. Так как сопротивление резанию пропорционально толщине стружки, ими было выяснено, что оно зависит от угловой скорости привода станка. Была предложена специальная система управления, оснащённая контроллером с обратной связью. Данный контроллер получил название Perfect Tracking Control (PTC). Метод SSV с высокой частотой вращения шпинделя рассматривался этими исследователями в виде математической модели. В дальнейшем они планируют реализовать этот метод в процессе резания. Таким образом, была подтверждена эффективность способа SSV, осуществляемого с помощью разработанной ими системы управления.

В публикации [9] рассматривается работа SSV с синусоидальным изменением частоты вращения шпинделя при торцевом фрезеровании (SSSV – Sinusoidal Spindle Speed Variation). Авторами были проведены два исследования: симуляция SSV и экспериментальная обработка. Для проведения экспериментальных испытаний, основанных на SSSV, было встроено программное обеспечение (ПО) в станок с ЧПУ. Это сделали с целью показать техническую эффективность SSSV, направленную как на низкие, так и высокие частоты вращения шпинделя. В итоге было обнаружено, что этот метод не подходит для подавления автоколебаний при высокоскоростной обработке сплавов с низкой твёрдостью и для общего торцевого фрезерования твёрдых материалов. Был сделан вывод, что данный метод будет эффективен для операций черновой обработки материалов с низкой обрабатываемостью (титан, нержавеющая сталь и т. д.) или в случаях, когда вибрации создаются менее жёстким зажимным устройством. Исследователями было отмечено, что SSV может обеспечить более значительный эффект при точении. В будущем ими планируется провести исследования по динамической устойчивости привода шпинделя и наблюдение за энергопотреблением при обработке методом SSV.

В статье [8] рассматривали SSV при синусоидальном и треугольном законах изменения частоты вращения шпинделя при высоких скоростях. Было установлено, что при одинаковых параметрах SSV синусоидальная модуляция более эффективна, чем треугольная из-за инерционных нагрузок. Было показано, что процесс фрезерования предпочтительнее стабилизировать за счёт увеличения амплитуды изменения скорости вращения шпинделя, в то время как частота изменения самой скорости не оказывает существенного влияния на динамическое поведение технологической системы. Построены диаграммы стабильного резания для прогнозирования максимально возможной скорости резания. Экспериментально проверены прогнозы модели, основанные на методологии, предложенной в данном исследовании. Опытным путём доказано, что обрабатываемость деталей, оцениваемая по шероховатости обработанной поверхности, улучшается при использовании метода SSV.

Авторы статьи [11] предложили общий метод анализа устойчивости и оптимизации параметров в процессе резания с применением SSV. Здесь с помощью рядов Фурье изменение скорости вращения шпинделя во времени при различных параметрах объединены в одну структуру. Затем временная задержка выводится неявно и рассчитывается эффективно с использованием точного алгоритма на основе обычных дифференциальных уравнений. После включения унифицированной скорости вращения шпинделя и временной задержки в динамическую модель для анализа стабильности процессов фрезерования с переменной скоростью вращения шпинделя применяется метод многоступенчатого численного интегрирования по теории Флоке. По сравнению с другими методами, такими как метод полудискретизации и метод численного интегрирования с постоянным шагом, предлагаемый метод имеет следующие преимущества: высокую вычислительную точность и эффективность. Созданы специальные трёхмерные карты многоступенчатого численного интегрирования для того, чтобы сравнить различные случаи модуляции частоты вращения шпинделя с определением уже оптимизированных параметров модуляции. В предлагаемом способе различные варианты модуляции частоты вращения шпинделя сравниваются в объединённой структуре: синусоидальная модуляция может обеспечить более высокую стабильность производительности, тогда как треугольная модуляция допускает большие параметры модуляции.

Для предсказания вибраций при фрезеровании с SSV предложено рассматривать её как изменение частоты вращения шпинделя методом коллокаций Чебышева [13]. По мнению авторов, такой подход позволяет получить более высокую точность предсказания вибраций за короткий

промежутков времени. Разработанный метод был основан на преобразовании координат из временного в угловой домен для получения набора дифференциальных уравнений задержки с её фиксацией, представляющей процесс фрезерования. Данный метод был выполнен для условий реального промышленного производства.

Помимо рассмотренных, были выполнены работы по модулированию скорости резания при концевом фрезеровании [2, 4]. Например, была разработана программа, которая модулировала скорость вращения шпинделя по синусоидальному гармоническому закону. Выводом данной публикации является то, что программа эффективно справляется с поставленной задачей подавления автоколебаний. Однако в ней отсутствуют рекомендации по использованию данного метода.

Краткий обзор рассмотренных выше работ показывает, что метод SSV завоевывает популярность как надёжное средство повышения динамической устойчивости процессов лезвийной механической обработки. Но его широкому промышленному внедрению препятствует отсутствие рекомендаций по выбору частоты и глубины модуляции скорости резания, которые могут быть полностью отработаны системой ЧПУ станка из-за инерционности шпинделя и заготовки. Кроме того, в литературных источниках отсутствуют сведения о требуемых значениях параметров модуляции для надёжного подавления возникающих в технологической системе автоколебаний в зависимости от их уровня. В этой связи представленная статья посвящена изучению возможностей реализации модуляции скорости резания системой ЧПУ станка и оценке степени гашения автоколебаний при концевом фрезеровании.

Оборудование и методы

Исследование проводили на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ модели DMG DMC 635V. Для измерения сил резания применяли динамометрическую платформу Kistler 9253B23. Вибрации измеряли лазерным виброметром Polytec OFV-505 и обрабатывали в модуле Sounds and Vibrations National Instruments. Профилометр Form Talysurf 200 был использован для определения качества обработанной поверхности. В качестве режущего инструмента была выбрана концевая монолитная твердосплавная четырёхзубая фреза диаметром 16 мм с углом наклона винтовой канавки 46° , передним углом 15° , задним углом 12° и длиной рабочей части 38 мм. При назначении режимов резания учитывали, что выбранный инструмент предназначен для фрезерования труднообрабатываемых материалов [6].

При проведении опытов по модулированию скорости при фрезеровании было выполнено 6 проходов фрезы по заготовке. Ширина фрезерования составила 20 мм, радиальная глубина резания – 0,5 мм. Заход фрезы при обработке в заготовку осуществляли по радиусу 2 мм.

Был проведён эксперимент по фактической отработке глубины модуляции и определению силовых нагрузок, возникающих в процессе выполнения программы при частоте вращения шпинделя 800 об/мин с различной глубиной модуляции, которую изменяли от 0 до 5 % с шагом в 1 %, и относительной частотой модуляции 0,25 мод/об; 0,5 мод/об; 1 мод/об и 2 мод/об.

Для реализации SSV на станке с ЧПУ в нашей работе было использовано ПО модулирования скорости резания для токарных станков компании Siemens [14]. На основе этого ПО была разработана специальная программа для фрезерного станка с ЧПУ. Данная программа представляет собой изменение частоты вращения шпинделя по таймеру.

Подавление вибраций на заготовке может быть достигнуто изменением постоянной скорости. Для этого программно изменяется заданное значение частоты вращения шпинделя. Таким образом, установленное значение частоты вращения шпинделя колеблется между верхней и нижней границами установленной скорости модулирования в период определённого времени.

Процесс модулирования скорости резания имеет определённые настроечные параметры: относительную частоту и глубину модуляции. Относительной частотой модуляции называется количество изменений частоты вращения шпинделя за один его оборот. Глубина, или амплитуда модуляции представляет собой величину, равную половине разницы между двумя крайними значениями частоты вращения шпинделя. Данный параметр чаще всего указывают в процентах от номинальной (средней) скорости резания.

Главным фактором при подавлении вибраций является динамика шпинделя и масса инструмента. Ввиду отсутствия методики, параметры модулирования (глубина модуляции, относительная частота модуляции) находятся экспериментально для используемого инструмента и материала.

При отработке модуляции необходимо находить её рациональные параметры. Желаемое поведение вращения шпинделя показано на рис. 2. Постоянное колебание частоты вращения шпинделя происходит по синусоидальному закону.

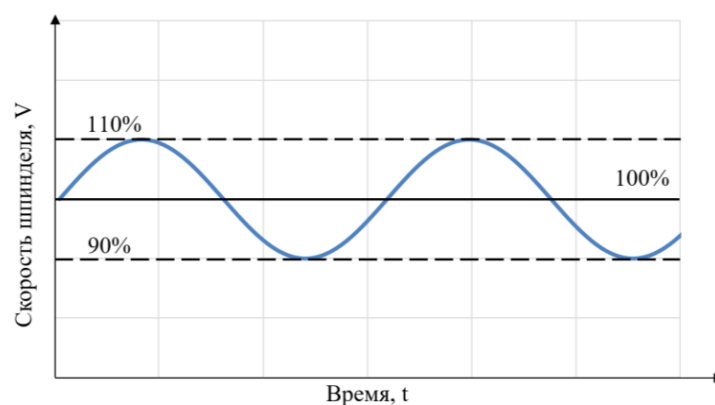


Рис. 2. Идеальная кривая отработки модуляции

На рис. 3 показано, как изменяется частота вращения шпинделя с очень большим временным коэффициентом. Частота вращения шпинделя кратковременно задерживается на верхнем или нижнем предельном значении, что приводит к преждевременному износу инструмента или же к снижению качества обработанной поверхности. Данный тип модуляции можно использовать, если задержка скорости в верхней и нижней частях составляет миллисекунды.

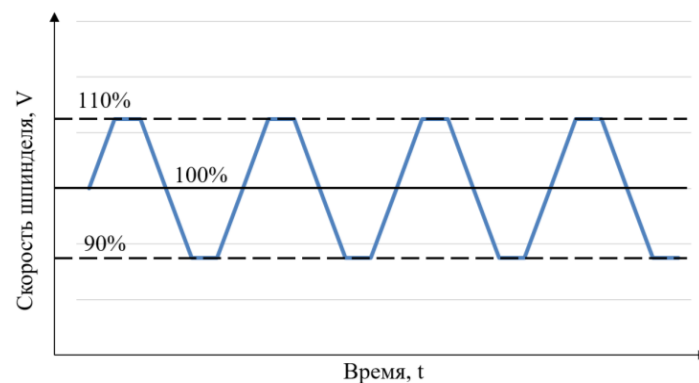


Рис. 3. Неблагоприятная отработка модуляции

Частоту модуляции, с которой проводили обработку поверхностей при фрезеровании, выбирали исходя из данных работы [7], согласно которой при фрезеровании наилучшей относительной частотой модуляции будет величина, равная двум.

Для концевое фрезерования заготовками являются тонкостенные пластины из незакалённой стали 20 с твёрдостью 110 НВ и размерами 120x100x6 мм, закреплённые в тисках с вылетом 80 мм и шириной 100 мм (см. рис. 4).

Предварительно был проведён модальный анализ инструментальной наладки в шпинделе станка при помощи аппаратно-программного комплекса CutPro. Методика построения лепестковых диаграмм устойчивости технологической системы при резании подробно описана в работе [5].

На основании этой диаграммы были выбраны неблагоприятные, находящиеся на границе устойчивости, параметры режимов резания, которые сопровождаются вибрациями при обработке (см. рис. 5).

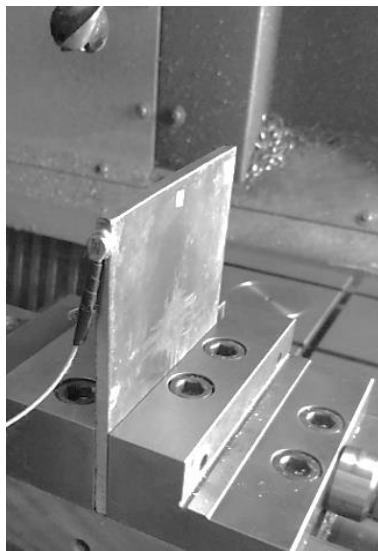


Рис. 4. Экспериментальная установка для модуляции частоты вращения шпинделя при концевом фрезеровании

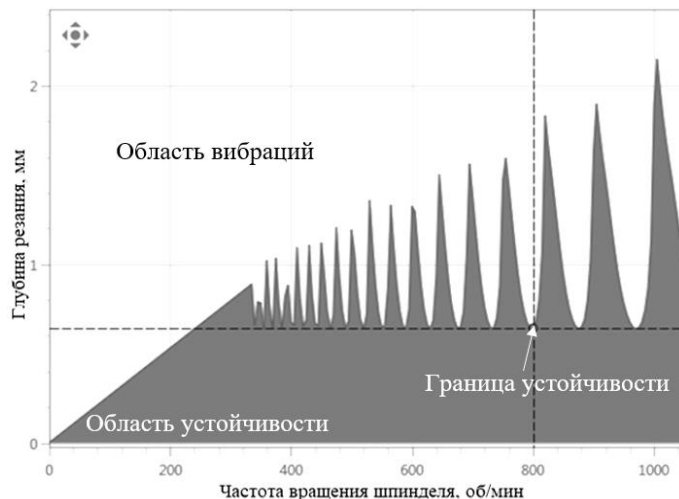


Рис. 5. Диаграмма областей стабильного резания для концевой фрезеровки

По результатам модального анализа были выбраны следующие режимы резания: частота вращения шпинделя $n=816$ об/мин при подаче $f=0,05$ мм/зуб.

Результаты и обсуждение

Одной из задач исследования было определение поведения станка по отработке назначенных параметров модуляции. При проведении опытов было установлено, что модуляция скорости резания вызывает дополнительные нагрузки на шпиндель (см. рис. 6).

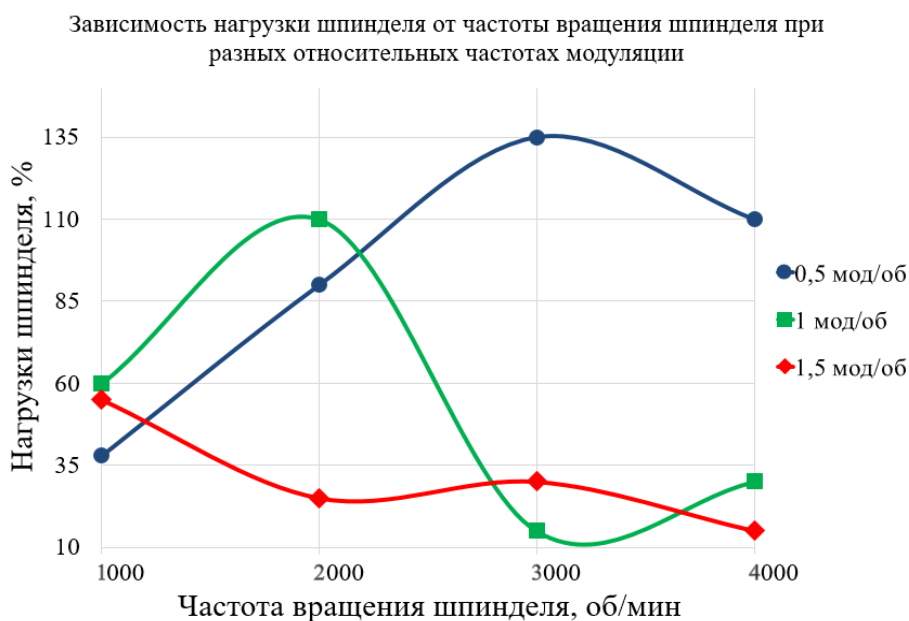


Рис. 6. Дополнительные нагрузки на шпинделе при модуляции

Это обусловлено динамикой шпинделя, а именно его инерционностью. Данная ситуация проявляется при увеличении частоты вращения шпинделя и относительной частоты модуляции. При этом станок в некоторых случаях пытается модулировать большую частоту вращения шпинделя, что вызывает дополнительные нагрузки и неполную обработку номинальной глубины модуляции.

По результатам эксперимента был построен график фактических обработок модуляции при частоте вращения шпинделя 800 об/мин (см. рис. 7).

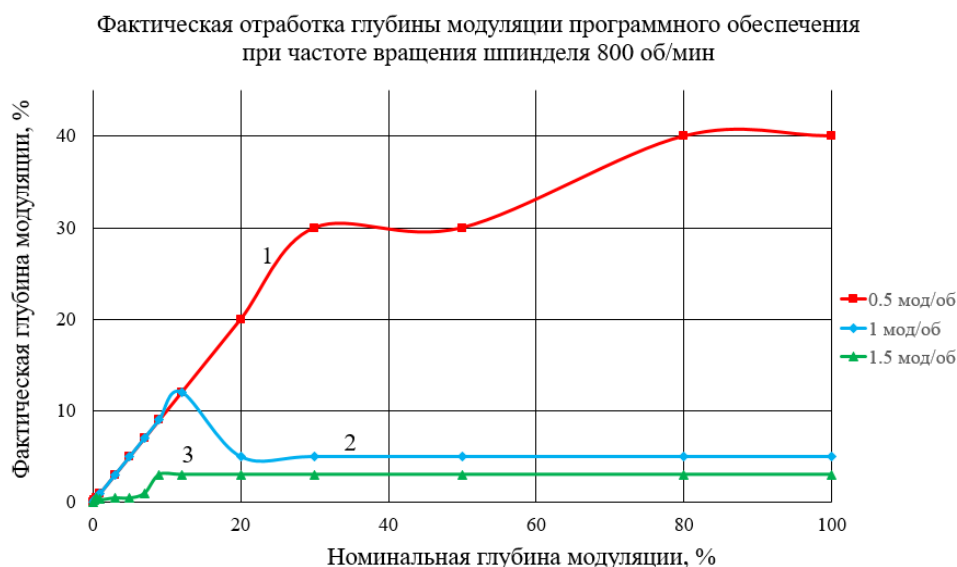


Рис. 7. График фактической обработки глубины модуляции при частоте вращения шпинделя 800 об/мин при относительных частотах модуляции: 1 – 0,5 мод/об; 2 – 1 мод/об; 3 – 1,5 мод/об

На графике (см. рис. 7) изображены фактические обработки глубин модуляции на частоте вращения шпинделя 800 об/мин. Можно видеть, что при увеличении параметра относительной частоты модуляции значение фактической обработки модуляции значительно уменьшается. К тому же глубина модуляции имеет определённый предел, дальше которого модуляция при заданных параметрах не выполняется. Например, для частоты вращения шпинделя 800 об/мин и при номинальной глубине модуляции в 20 % и относительной частоте в 1 мод/об фактическая глубина составила 5 %, то есть при дальнейшем увеличении глубины модуляции фактическое значение данного параметра меняться не будет. Теоретические глубины модуляции выбраны исходя из нагрузки, возникающей на шпинделе станка. Таким образом, при частоте вращения 800 об/мин шпиндель не испытывает нагрузок выше 50 % во всём диапазоне модуляции.

Следующей частью проведения опытов является определение возможностей станка к реализации модуляции (см. рис. 8). Кривыми линиями обозначены относительные частоты модуляции согласно формуле $f = \frac{f_{\text{mod}} \cdot n}{60}$, где f_{mod} – относительные частоты, мод/об; n – частота вращения шпинделя, об/мин.

Данная диаграмма определяет величину глубины модуляции, которую станок будет обрабатывать в полной мере без искажения. Максимальную обработку модуляции выбирали исходя из меньших нагрузок на шпиндель и корректной обработки графического сервиса Servo Trace системы ЧПУ, в котором визуально отображается динамика шпинделя.

Например, при абсолютной частоте модуляции в диапазоне 0,4...1,67 Гц и частоте вращения шпинделя 1500 оборотов в минуту максимальная обработка глубины модуляции скорости резания составила 100 %, а при 2000 оборотах – 70 % и так далее.

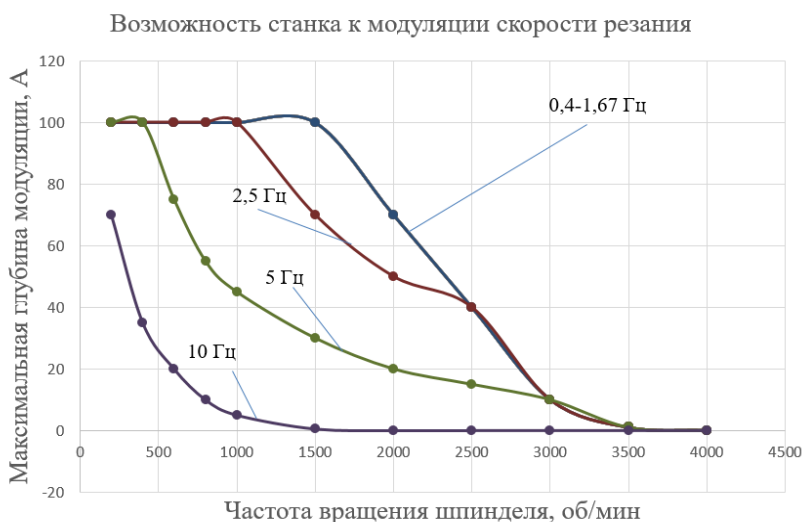


Рис. 8. График зависимости максимальной глубины модуляции от частоты вращения шпинделя

По результатам опытов был построен график возможности привода станка обрабатывать модуляцию частоты вращения шпинделя (см. рис. 9). График показывает зависимость абсолютной частоты модуляции, выраженной в герцах, от частоты вращения шпинделя.

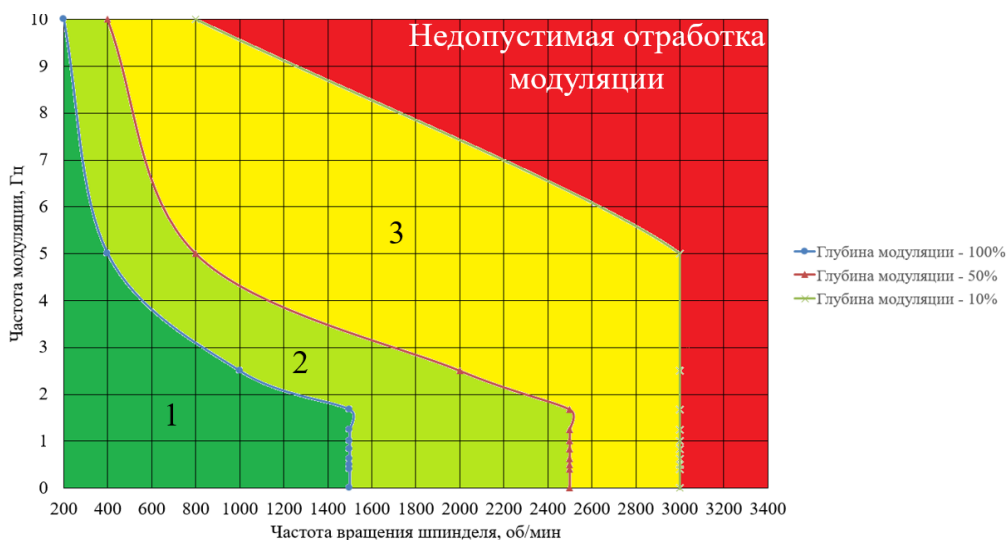


Рис. 9. График возможности привода станка обрабатывать модуляцию: 1 – 100 %-я обработка модуляции; 2 – 50 %-я обработка модуляции; 3 – 10 %-я обработка модуляции

Так, например, при частоте вращения шпинделя в 1500 об/мин максимальная обработка частоты модуляции составляет 1,67 Гц, а при 200 об/мин максимальная обрабатываемая частота модуляции составит 10 Гц.

Согласно рекомендациям [7] относительная частота модуляции скорости резания за один оборот фрезы должна быть равна половинному количеству зубьев инструмента. Отсюда следует, что при обработке параметров программного обеспечения, которые приведены выше, относительная частота модуляции, равная двум, при количестве зубьев концевой фрезы 4 не будет обрабатываться. Следовательно, необходимо выбирать относительную частоту модуляции за оборот, близкую к значению 2. В итоге была принята относительная частота модуляции в 1 мод/об, а для расширения данных эксперимента и подтверждения теоретических положений работы [7] – 0,5 мод/об; 0,25 мод/об.

После того как были проведены опыты при всех возможных значениях обрабатываемых параметров, было установлено, что при глубине модуляции 5 % и выше станок начинает некорректно обрабатывать заданную подачу, постепенно выходя на самоторможение. Данная ситуация отрицательно влияет как на сам станок, так и на инструмент. В итоге было поставлено условие: глубина модуляции не должна превышать 5 %.

Вторая серия опытов показала возможности гашения автоколебаний путём модуляции частоты вращения шпинделя уже при резании.

При резании без модуляции амплитуда автоколебаний составляет 3,2 мкм (см. рис. 11). На обработанной поверхности отчётливо видны следы колебаний (см. рис. 10). При 1 мод/об и дальнейшем увеличении глубины модуляции амплитуда автоколебаний уменьшается, что отражается на качестве обработанной поверхности. Минимальные виброперемещения наблюдаются при глубине модуляции в 3 %, амплитуда автоколебаний при которой составляет 0,14 мкм.



Рис. 10. Вид обработанных поверхностей при концевом фрезеровании с глубиной модуляции: 1 – $A=0$ %; 2 – $A=1$ %; 3 – $A=2$ %; 4 – $A=3$ %; 5 – $A=4$ %; 6 – $A=5$ %

При дальнейшем увеличении глубины модуляции до 5 %, как указывалось выше, наблюдается самоторможение подачи, что приводит к некорректной отработке модуляции скорости резания. Это приводит к образованию «зарезов» на обрабатываемой поверхности, увеличению виброперемещений и сил резания.

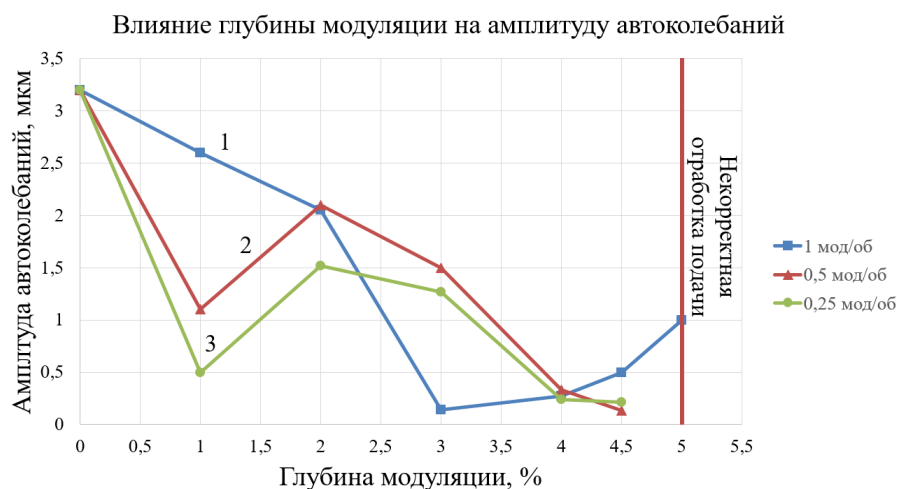


Рис. 11. График зависимости виброперемещений от глубины модуляции: 1 – 1 мод/об; 2 – 0,5 мод/об; 3 – 0,25 мод/об

Согласно графику зависимости амплитуды автоколебаний от глубины модуляции наиболее подходящей относительной частотой является 1 мод/об, так как данная частота наиболее близка к частоте 2 мод/об, которая уже не обрабатывается из-за динамики шпинделя. При относительной частоте модуляции 1 мод/об постепенно увеличивается динамическая устойчивость технологической системы, повышая при этом глубину модуляции до 4 %, что и можно заметить при построении графика зависимости, где наблюдается плавное понижение амплитуды автоколебаний. В остальных случаях наблюдаются резкие скачки измеряемого параметра, так как сам метод модулирования скорости резания имеет как положительное, так и отрицательное влияние на обработку.

Выводы

1. Обработка с модулированной скоростью резания является одним из наиболее перспективных путей уменьшения автоколебаний, повышения производительности механообработки и эксплуатационных характеристик готовых изделий.

2. Реальный фрезерный станок не может полностью обработать некоторые заданные параметры модуляции из-за инерционности шпинделя. Это иллюстрируют графики обработки параметров модуляции на исследуемых частотах вращения шпинделя.

3. Оптимальными параметрами модуляции для исследованной технологической системы являются относительная частота модуляции $f_{\text{mod}}=1$ и глубина модуляции $A=4$ %, которые позволили добиться уменьшения амплитуды колебаний заготовки на частотах автоколебаний почти в 11,5 раза.

4. Рассмотренный метод подавления автоколебаний недостаточно изучен и требует дальнейших исследований для определения рекомендуемых параметров модуляции как при работе на разных режимах резания, так и при обработке большого спектра заготовок с разными размерами и типами материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдурахманов, А. У. Анализ причин возникновения автоколебаний при механической обработке резанием / А. У. Абдурахманов, Э. Ш. Джемилев // Таврический научный обозреватель. – 2016. – № 5(10) – 2016. – С. 252-257.
2. Применение модуляции скорости главного движения фрезерного станка для гашения регенеративных автоколебаний при фрезеровании тонкостенных деталей / Ю. Н. Внуков, В. В. Натальчишин, А. И. Гермашев, М. В. Кучугуров, С. И. Дядя // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2014. – № 3(72) – С. 12-17.
3. Моделирование вибраций при плоском фрезеровании с коррекцией частоты вращения в режиме реального времени / И. И. Иванов, С. А. Воронов, С. М. Николаев, В. А. Куць // Наука и образование (МГТУ имени Н. Э. Баумана). – 2017. – № 3. – С. 1-16.
4. Особенности реализации возможностей управления приводами станков на базе стойки чпу siemens / М. В. Кучугуров, А. И. Гермашев, С. И. Дядя, А. В. Пирожок // Високітехнології в машинобудуванні. – 2015. – Випуск 1(25). – С. 80-87.
5. Савилов, А. В. Оптимизация процессов механообработки на основе модального и динамометрического анализа / А. В. Савилов, А. С. Пярых, С. А. Тимофеев // Наука и технологии в промышленности. – 2013. – № 1-2. – С. 42-46.
6. Современное состояние производства высокопроизводительного режущего инструмента из порошковых быстрорежущих сталей и твёрдых сплавов / А. В. Савилов, Д. С. Никулин, Е. П. Николаева, А. Е. Родыгина // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 6(77). – С. 26-33.
7. Свинин, В. М. Выбор параметров модуляции скорости резания для гашения регенеративных автоколебаний / В. М. Свинин // Вестник Самарского ГТУ. Технические науки. – 2006. – № 41. – С. 135-142.
8. Anandkumar Telang Analysis of Spindle Speed for Maximum Chatter Doubling of High Frequency Milling Spindle / Anandkumar Telang // International Journal on Emerging Technologies. – 2015. – Vol. – 6(2). – P. 51-56.
9. Chatter avoidance method for milling process based on sinusoidal spindle speed variation method: simulation and experimental results, in: 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations / I. Bediaga, I. Egaña, J. Munoa, M. Zatarain, Ln Lopez de Lacalle. – Reggio Calabria, Italy, 2007. – P. 379-384.



10. Miroslav Piska On the Advanced Milling Technology of Thin-Walled Parts for Aerospace Industry / Miroslav Piska, Petra Ohnistova // Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2017. – P. 113-139.
11. Stability Analysis of Milling Processes With Periodic Spindle Speed Variation Via the Variable-Step Numerical Integration Method / Jinbo Niu, Ye Ding, LiMin Zhu, Han Ding // Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME. – 2016. – Vol. 138. – P. 1-11.
12. High – Frequency – Variation Speed Control of Spindle Motor for Chatter Vibration Suppression in NC Machine Tools / T. Ishibashi, H. Fujimoto, Sh. Ishii, K. Yamamoto, Yu. Terada // American Control Conference (ACC). – Portland, Oregon, USA, 2014. – № 4-6. – P. 2172-2177.
13. Efficient evaluation of process stability in milling with Spindle Speed Variation by using the Chebyshev Collocation Method / G. Totis, P. Albertelli, M. Sortino, M. Monno // Journal of Sound and Vibration 333. – 2014. – P. 646-668.
14. SINUMERIK 828D, 840D sl: Avoiding vibration in slewing gear pieces [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://support.industry.siemens.com>.
15. Spindle Speed Variation – Stop chatter during CNC turning [Электронный ресурс]. – Haas Automation. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=kR6KUsh-jg4>.

Туев М. Ю.
M. Yu. Tuev

**ДЕФОРМИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО УСТАНОВКИ СОВМЕЩЁННОГО ПРОЦЕССА
НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ**

**DEFORMING DEVICE OF THE INSTALLATION OF THE COMBINED PROCESS
OF CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION FOR THE PRODUCTION
OF THE METAL PRODUCTION PRODUCT**

Туев Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии Российского государственного профессионального педагогического университета (Россия, Екатеринбург); 620012, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11. E-mail: tuev-m@mail.ru.

Mr. Mikhail Yu. Tuev – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Engineering and professional instruction in machine building and metallurgy of Russian State Professional Pedagogical University (Russia, Yekaterinburg); 620012, Sverdlovsk region, Yekaterinburg, 11 Machine Builders str. E-mail: tuev-m@mail.ru.

Аннотация. Предложена принципиально новая конструкция деформирующего устройства с высокими обжатиями и технологическими возможностями, позволяющими использовать её в совмещённом процессе непрерывного литья и деформации для получения листа шириной до 2800 мм из различных сталей и сплавов. Конструкция деформирующего устройства, выполненная в виде ковочного блока с приводом от двух эксцентриковых валов, позволяет устанавливать её в рабочие прокатные клетки с использованием главной линии и другого технологического оборудования стана без изменений. Такое решение значительно упрощает и удешевляет процесс создания литейно-прокатных комплексов с использованием установок непрерывного литья и деформации при реконструкции металлургических заводов.

Summary. Is proposed the fundamentally new construction of the deforming device with the high reductions and the technological possibilities making it possible to use it in that combined the process of continuous casting and deformation for obtaining the sheet with a width of up to 2800 mm made of different steels and alloys. The construction of the deforming device, executed in the form of forging block, with the drive from two eccentric shafts makes it possible to establish it in the working rolling cages with the use of main line and another technological equipment of camp without the changes. This solution considerably simplifies and reduces the cost of the process of creating the foundry-rolling complexes with the use of installations of continuous casting and deformation during the reconstruction of metallurgical plants.

Ключевые слова: совмещённый процесс, конструкция, эксцентриковые валы, непрерывное литьё, циклическая деформация, лист, качество.

Key words: the combined process, construction, eccentric shafts, continuous casting, cyclic deformation, sheet, the quality.

УДК 621.746

Развитие совмещённых процессов непрерывного литья и деформации для производства листовой металлопродукции с целью существенного снижения энергоёмкости технологического процесса, металлоёмкости оборудования, капитальных и эксплуатационных затрат и улучшение качества листа из металлов и сплавов выдвигают новые требования к технологическим и конструктивным параметрам создаваемых установок.

Предлагаемые технологии основаны на объединении в одной установке процессов кристаллизации металла, подачи, формирования слитка и пластической деформации затвердевающего металла с высокими обжатиями до требуемых размеров. Такой совмещённый процесс реализован

в установке непрерывного литья и деформации для производства листа из цветных металлов и сплавов [1; 2].

Анализ данных таких технологических процессов выявил ряд конструктивных и технологических недостатков. Прежде всего это связано с необходимостью обеспечить заданную производительность и снизить металлоёмкость оборудования при получении металлопродукции высокого качества. Отсюда следует, что задача создания установок совмещённого процесса непрерывного литья и деформации весьма сложная. Эта задача может быть успешно решена в новой схеме деформации металла и новой конструкции деформирующего устройства.

Новый подход в решении поставленных задач предложен при создании новой установки совмещённого процесса непрерывного литья и деформации для производства листа [3; 4].

Деформирующее устройство, показанное на рис. 1, как основной элемент установки непрерывного литья и деформации для производства металлопродукции выполнено в виде ковочного блока, содержащего станину 1, эксцентриковые валы 2 и 3, смонтированные в станине своими неподвижными осями на подшипниках скольжения 4. Эксцентриковые валы 2 и 3 посредством муфт 5 и 6 соединены с приводом, который состоит из электродвигателя и шестерённой клетки (на рис. 1 не показаны), обеспечивающей синхронное вращение эксцентриковых валов навстречу друг другу. На подвижных осях эксцентриковых валов 2 и 3 установлены на подшипниках скольжения 7 суппорты 8 и 9. Суппорты посредством пальца 10 соединены между собой с возможностью вращения вокруг него на подшипнике 11. Суппорт 8 в месте соединения выполнен в виде вилки, а суппорт 9 – в виде выступа. При этом ось пальца 10 расположена на равном расстоянии от оси эксцентриковых валов 2 и 3 и смещена в сторону от бойков для пропуска полосы через устройство. Бойки 13 и 14 с помощью клиньев 15 крепятся в пазах суппортов 12.

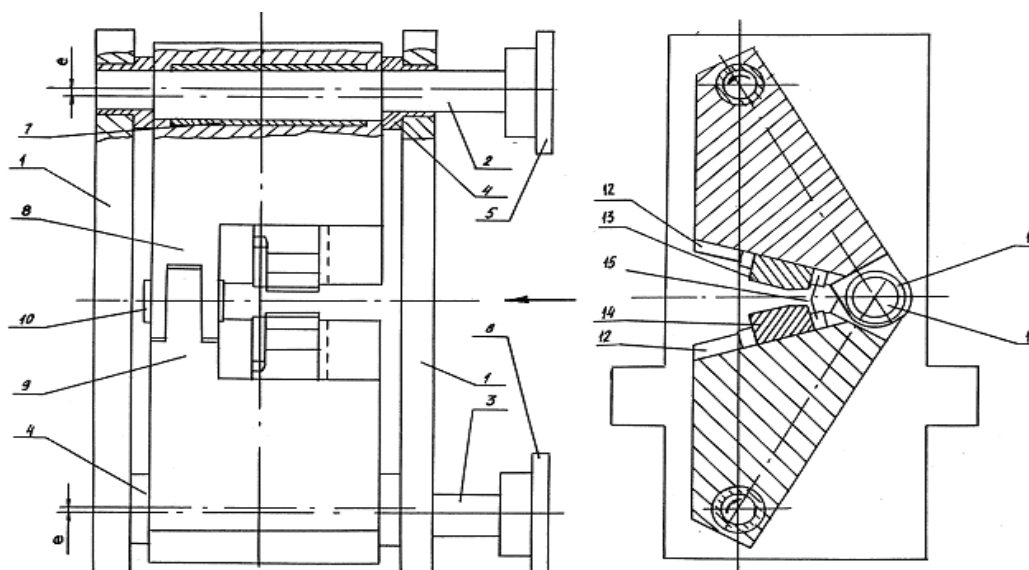


Рис. 1. Ковочный блок установки совмещённых процессов непрерывного литья и деформации

При синхронном вращении эксцентриковых валов 2 и 3 суппорты 8 и 9 совершают плоское движение по законам движения шатуна кривошипно-шатунного механизма. При этом один конец шатуна – суппорта совершает движение по окружности с радиусом, равным эксцентриситету «е», а другой – возвратно-поступательное движение по оси подачи полосы. При этом бойки захватывают полосу калибрующим участком и одновременно обжимают и подают её. Во время холостого хода бойки возвращаются в положение, при котором происходит следующий захват полосы, при этом происходит подача полосы бойками на некоторую величину.

Ковочный блок циклической деформации, представляющий собой сдвоенный, симметричный относительно оси прокатки кривошипно-шатунный механизм. Каждый из двух его бойков имеет расположенные под некоторым профильным углом друг к другу обжимной и калибрующий участки, разделённые граничной точкой, крепится на шатуне с возможностью настроечного перемещения относительно шатуна, что позволяет, используя один комплект бойков, устанавливать различные размеры получаемой продукции путём перемещения бойков по направляющим суппортов.

Предлагаемое деформирующее устройство, выполненное в виде ковочного блока, в составе установки совмещённого процесса непрерывного литья и деформации для производства листа обладает рядом преимуществ.

Для обеспечения заданной производительности необходимо обеспечить величину единичной подачи формируемой заготовки, составляющей 20...30 мм за один оборот вала при величине вытяжки, равной 5 и более. Существующие ранее установки не способны обеспечить такую производительность в режиме самоподачи, которая напрямую зависит от величины эксцентриситета эксцентрикового вала. Ковочный блок за счёт рычажной конструкции обеспечивает заданную величину самоподачи при неизменном эксцентриситете эксцентрикового вала.

Установка бойков на суппортах, каждый из которых приводится одним эксцентриковым валом и связан с противоположным суппортом общим шарниром, распределяет нагрузку таким образом, что максимальная нагрузка от деформации полосы приходится на неприводной общий шарнир, тем самым снижая нагрузку на подшипники приводных эксцентриковых валов.

Перемещая бойки в суппортах параллельно оси, соединяющей оси шарниров суппортов, появляется возможность регулирования толщины получаемой полосы.

Привод ковочного блока от двух эксцентриковых валов позволяет использовать в качестве клетей и главного привода существующее оборудование прокатных клетей, что существенно снижает капитальные затраты на реконструкцию и модернизацию клетки прокатного стана и создание на его основе всего участка установки совмещённого процесса непрерывного литья и деформации для производства металлопродукции.

Кроме деформирующего устройства, для создания участка потребуется кристаллизатор, выполненный известным способом, со всем технологическим оборудованием с установкой ковочного блока в непосредственной близости за кристаллизатором.

Заключение

Изложен новый подход к компоновке установки совмещённого процесса непрерывного литья и деформации для производства металлопродукции; предложена новая конструкция деформирующего устройства. Показаны преимущества новой схемы деформации металла и возможности использования существующих прокатных клетей, линии главного привода и другого существующего технологического оборудования при создании новых технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лехов, О. С. Совмещённые процессы непрерывного литья и деформации для производства проката / О. С. Лехов, Ю. С. Комратов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – 411 с.
2. Лехов, О. С. Исследование совмещённого процесса непрерывного литья и деформации для получения листа из алюминия / О. С. Лехов, Ю. С. Комратов, М. Ю. Туев // Производство проката. – 2009. – № 6. – С. 41.
3. Пат. № 2077407 РФ. Способ непрерывного литья заготовок и устройство для его осуществления / О. С. Лехов // БИ. 2000. – № 5.
4. Пат. № 2063275 РФ. Прокатно-ковочный стан / М. Ю. Туев, О. С. Лехов, А. В. Малахов; заявл. 25.05.1994; опубл. 10. 07. 96. Бюл. № 19.



Еренков О. Ю., Проценко А. Е., Шпилев А. М.
O. Yu. Erenkov, A. E. Protsenko, A. M. Shpilev

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА ПУТЁМ ВИБРАЦИОННОЙ
ОБРАБОТКИ ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО**

**INCREASING THE STRENGTH OF FIBERGLASS BY MEANS OF EPOXY BINDER
VIBRATION TREATMENT**

Еренков Олег Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры химии и химических технологий Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: erenkov@list.ru.

Mr. Oleg Yu. Erenkov – Dr.hab. of Engineering, professor, Department of Chemical Technology, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk territory, Khabarovsk, 136 Pacific str. E-mail: erenkov@list.ru.

Проценко Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии переработки нефти и полимеров Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: protsenko.ae@yandex.ru.

Mr. Alexander E. Protsenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Technology of oil and polymer processing, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: protsenko.ae@yandex.ru.

Шпилев Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Shpilev@knastu.ru.

Mr. Anatoly M. Shpilev – Dr.hab. of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Shpilev@knastu.ru.

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния предварительной вибрационной обработки полимерного связующего непосредственно перед его отверждением в пресс-форме на механические характеристики стеклопластика. Приведены результаты механических исследований и их физическая интерпретация.

Summary. The authors present results of experimental studies of the effect of pre-treatment of vibration polymer binder immediately before curing in the mold on the mechanical characteristics of fiberglass. The results of investigations of mechanical and physical interpretation are given.

Ключевые слова: стеклопластик, полимерное связующее, надмолекулярная структура, амплитуда колебаний, частота колебаний, механические свойства.

Key words: fiberglass, polymer binder, super molecular structure, oscillation amplitude, oscillation frequency, mechanical properties.

УДК 621.763

Введение

Благодаря особым свойствам, присущим только пластическим массам, применение их в машиностроении открывает широкие конструктивно-технологические возможности для создания машин и аппаратов на более высоком техническом уровне. Многие пластмассы, являясь самостоятельными конструкционными материалами, с большим успехом вытесняют как цветные, так и чёрные металлы.

При этом особого внимания заслуживают стеклопластики, представляющие собой термореактивную пластмассу, состоящую из синтетической смолы со стекловолокнистым наполнителем. Высокая удельная прочность в сочетании с хорошей химической стойкостью по отношению ко многим агрессивным средам открывает возможности использования стеклопластиков в различных отраслях промышленности и, в частности, в центробежных компрессорных машинах, обслуживающих различные химические производства [1].

Несмотря на многообразие способов получения деталей и изделий из стеклопластиков, применение их в качестве конструкционного материала часто ограничивается достигнутым уровнем их прочностных свойств, которые, в свою очередь, лимитируются несовершенством технологического процесса и нестабильностью свойств полимерных связующих. Очень часто имеют место механические повреждения деталей наиболее нагруженных узлов энергетических машин, таких как рабочие лопатки, диски и т. д. Таким образом, задача повышения прочностных свойств стеклопластиков, в том числе за счёт новых технологических решений, является актуальной.

Рассмотрим решение поставленной задачи на основе структурной модификации полимерного связующего путём его предварительной вибрационной обработки перед операцией пропитки наполнителя.

Цель работы – исследование взаимосвязи между прочностными свойствами деталей из стеклопластика, изготавливаемых методом вакуумно-компрессионной пропитки, и видом, параметрами предварительных электрофизических воздействий на эпоксидное связующее.

Методика проведения исследований

В качестве материала для изготовления экспериментальных образцов использовано полимерное связующее Этал Т 210, наполнитель – стеклоткань Т11, замасливатель – ГВС9. Были изготовлены образцы стеклопластика типа Этал Т 210-Т11-ГВС9 с помощью установки вакуумно-компрессионной пропитки и печи сопротивления для термообработки материала, установленной на ОАО «Дальэнергомаш» (г. Хабаровск) [2; 3].

Образцы связующего и стеклопластика в виде пластин и лопаток подвергались исследованиям в соответствии с ГОСТ 4648-71 «Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб» и ГОСТ 11262-80 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение»: испытания образцов связующего с целью определения напряжений сжатия, растяжения, изгибающих напряжений, прочности при межслойном сдвиге, ударной вязкости и твёрдости как после электрофизического воздействия, так и без него; испытания образцов стеклопластика с целью определения напряжений растяжения, изгибающих напряжений, прочности при межслойном сдвиге, ударной вязкости и твёрдости как после электрофизического воздействия, так и без него. Определение параметров, характеризующих механические свойства исследуемого материала, проводили на испытательных машинах моделей УММ-20, МК-30А, ТБ 5004. Качество обработанной резанием поверхности деталей из исследуемого материала контролировали при помощи профилометра ТК 200 (США). Оценивались основные параметры шероховатости согласно ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики» и международному стандарту 4287-2014 (ГОСТ Р ИСО 4287-2014 «Геометрические характеристики изделий. Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности»). Токарную обработку проводили на токарном патронно-центровом станке с ЧПУ модели РТ755Ф311, а разрезку – абразивным кругом. Контроль изменения плотности полимерного связующего производили при помощи дефектоскопа ультразвукового УД2-12 общего назначения, при этом величина изменения плотности оценивалась по изменению величины отношения входных амплитуд сигналов.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились в несколько этапов. На первом этапе проведён базовый эксперимент, цель которого – определение механических свойств исходного материала при стандартных условиях, то есть без применения предварительного воздействия на обрабатываемый материал. На втором этапе проведены экспериментальные исследования

изменения плотности отверждённых образцов полимерного связующего в зависимости от режимов виброобработки связующего в жидком состоянии. Третий этап был посвящён экспериментальному определению взаимосвязи между режимом виброактивации перед отверждением жидкого эпоксидного связующего и прочностными показателями стеклопластика.

Вибрационную обработку полимерного связующего производили с помощью механического вибратора, конструктивное исполнение которого позволяло реализовывать колебания частотой 50 и 100 Гц, амплитуда колебаний варьировалась от 2 до 60 мкм.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные, анализ которых позволяет сделать вывод о том, что вибрационная обработка жидкого полимерного связующего приводит к изменениям его структуры. Об этом свидетельствует факт изменения плотности образцов из связующего, при этом с увеличением времени виброактивации происходит повышение его плотности. Характер повышения явно имеет экспоненциальный характер, а оптимальное время виброактивации составляет 5 минут.

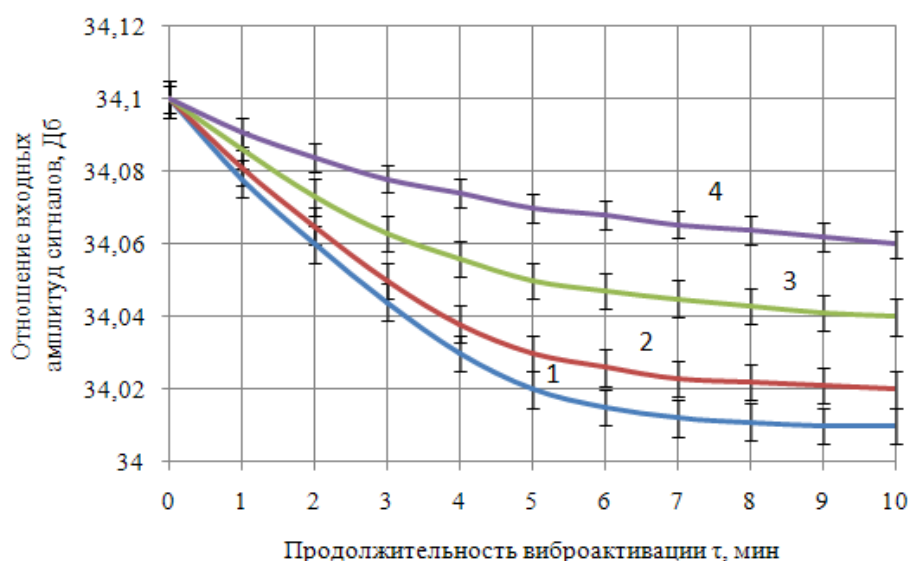


Рис. 1. Плотность образцов отверждённого полимерного связующего:
 1 – $f = 100$ Гц, $A = 60$ мкм; 2 – $f = 100$ Гц, $A = 20$ мкм; 3 – $f = 50$ Гц, $A = 60$ мкм;
 4 – $f = 50$ Гц, $A = 20$ мкм

Таким образом, можно предположить, что наиболее оптимальным режимом виброактивации из исследуемых в данной работе является такой: частота колебаний 100 Гц, амплитуда колебаний 60 мкм.

Повышение плотности полимерного связующего под действием механических колебаний происходит, по-видимому, за счёт дегазации массы связующего и более равномерного распределения отвердителя в объёме эпоксидного олигомера.

Оценить взаимосвязь между режимом виброактивации жидкого эпоксидного связующего (перед отверждением) и пределом прочности стеклопластика при статическом изгибе можно с помощью графически представленных на рис. 2 данных. В случае реализации указанных режимов виброактивации связующего наблюдается изначально увеличение предела прочности стеклопластика при изгибе, а затем, при превышении 5 мин виброобработки, либо некоторое снижение прочности, либо сохранение постоянного её значения.

Анализ полученных на данном этапе исследований экспериментальных данных позволяет подтвердить следующее предположение: наиболее оптимальный режим виброактивации из исследуемых в данной работе – частота колебаний 100 Гц, амплитуда колебаний 60 мкм. Именно при реализации данного режима обеспечивается максимальное значение предела

прочности при изгибе стеклопластика в случае предварительной виброобработки связующего в течение 5 минут.

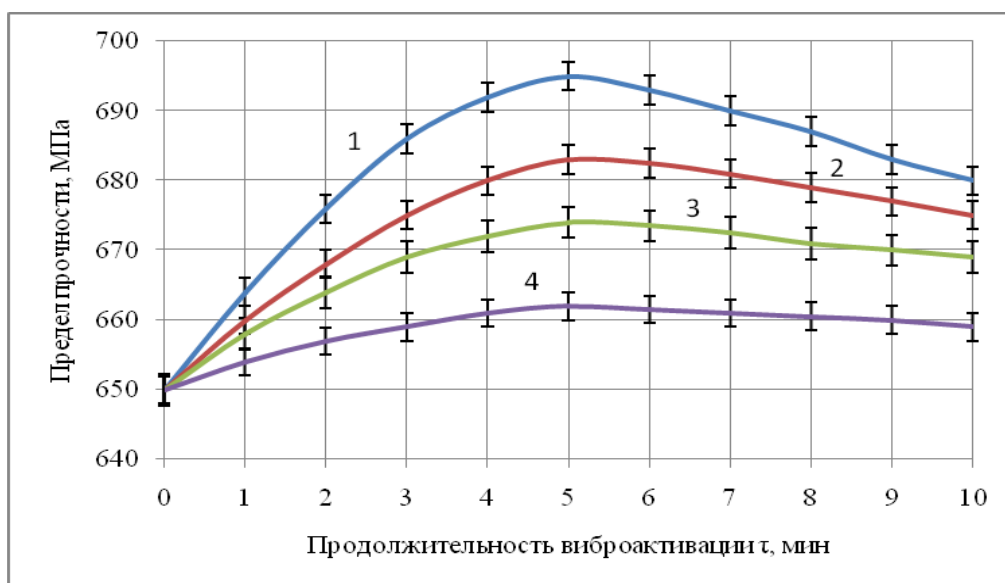


Рис. 2. Предел прочности при статическом изгибе образцов из стеклопластика:
 1 – $f = 100$ Гц, $A = 60$ мкм; 2 – $f = 100$ Гц, $A = 20$ мкм; 3 – $f = 50$ Гц, $A = 60$ мкм;
 4 – $f = 50$ Гц, $A = 20$ мкм

На рис. 3 графически представлены экспериментальные данные, позволяющие оценить взаимосвязь между режимом виброактивации перед отверждением жидкого эпоксидного связующего и ударной вязкостью стеклопластика. В случае реализации указанных режимов виброактивации связующего наблюдается изначально рост ударной вязкости стеклопластика при изгибе, а затем, при превышении 5 мин виброобработки, либо некоторое снижение ударной вязкости, либо сохранение постоянного её значения.

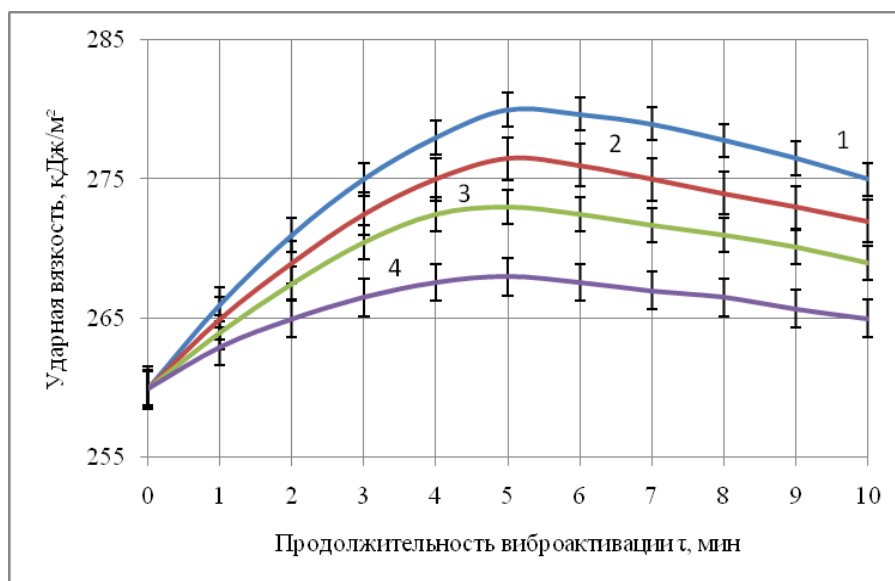


Рис. 3. Ударная вязкость образцов из стеклопластика:
 1 – $f = 100$ Гц, $A = 60$ мкм; 2 – $f = 100$ Гц, $A = 20$ мкм; 3 – $f = 50$ Гц, $A = 60$ мкм;
 4 – $f = 50$ Гц, $A = 20$ мкм

Результаты сравнительного анализа, полученные на данном этапе исследований экспериментальных данных, – прямое подтверждение предположения о том, что оптимальный режим виброактивации из исследуемых в данной работе – частота колебаний 100 Гц, амплитуда колебаний 60 мкм. Именно при реализации данного режима обеспечивается максимальное значение ударной вязкости стеклопластика в случае предварительной виброобработки связующего в течение 5 минут.

Повышение прочностных показателей стеклопластика можно объяснить следующим образом. Виброобработка связующего приводит к образованию более плотной и равномерной его структуры, обеспечивающей повышение степени равномерности пропитки наполнителя в виде стеклоткани полимерным связующим и, соответственно, усиление адгезии на границе раздела фаз «наполнитель – связующее».

В данной работе проводились экспериментальные исследования эффективности механической обработки стеклопластика Этал Т 210-Т11-ГВС9, полимерное связующее которого было предварительно обработано посредством механических колебаний частотой 100 Гц при амплитуде колебаний 60 мкм в течение 5 минут. Осуществлялись следующие виды механической обработки полученных впоследствии образцов: точение, резка. Основное требование, предъявляемое к указанным операциям – обеспечение минимального уровня шероховатости обработанной поверхности.

На рис. 4 представлены профилограммы обработанных точением поверхностей деталей из стеклопластика, а в табл. 1 сведены численные значения отдельных параметров шероховатости для случаев точения и резки заготовок из исследуемого материала.

Анализ данных (см. рис. 4 а, б и табл. 1) позволяет сделать заключение о том, что механическая обработка стеклопластика Этал Т 210-Т11-ГВС9, выполненного из предварительно обработанного посредством механических колебаний связующего, обеспечивает получение более качественно обработанной поверхности. Об этом свидетельствует экспериментально установленный факт снижения параметров шероховатости обработанной поверхности модифицированного стеклопластика до 2 раз по сравнению с поверхностью стандартного материала.

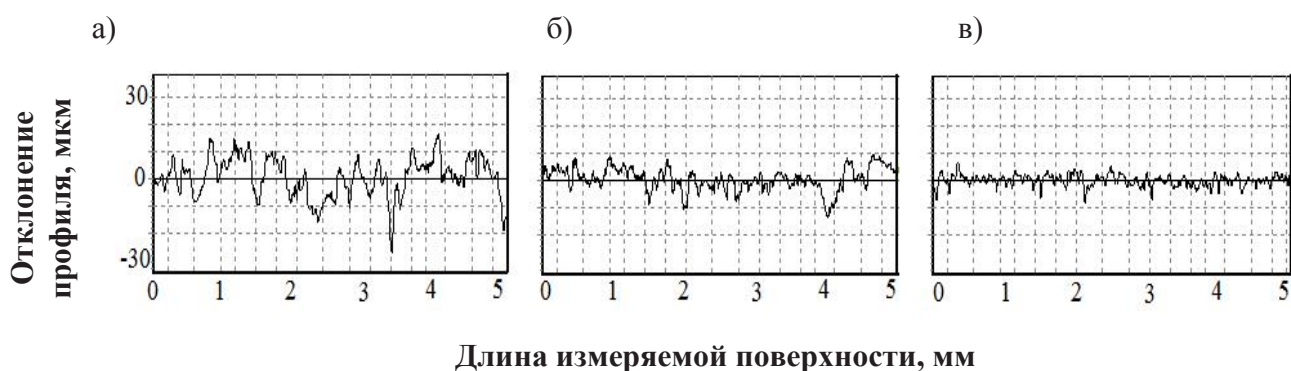


Рис. 4. Профилограммы обработанных точением поверхностей деталей из стеклопластика: а – без предварительной виброобработки связующего; б – виброобработка связующего (50 Гц, 20 мкм); в – виброобработка связующего (100 Гц, 60 мкм)

Таблица 1

Результаты исследования шероховатости поверхности деталей из стеклопластика
при различных видах обработки

Вариант точения	Параметры шероховатости, мкм						
	Ra	Rz	Rmax	Rp	Rm	Sm	Sk
Точение							
Обычное точение	12,61	32,72	30,97	14,02	21,95	0,337	0,976
С предварительной виброобработкой связующего (100 Гц, 60 мкм)	7,505	15,24	20,75	9,232	11,52	0,186	0,600
Разрезка							
Обычное точение	18,7	40,20	37,90	11,80	19,10	0,101	0,131
С предварительной виброобработкой связующего (100 Гц, 60 мкм)	12,88	29,33	22,37	6,203	8,55	0,098	0,103

Заключение

1. Доказан экспериментально факт изменения структуры полимерного связующего после предварительной его вибрационной обработки (перед отверждением), о чём свидетельствуют результаты исследования плотности образцов из связующего, а также установлены характер такого изменения и оптимальное время виброактивации, составляющее 5 минут.

2. Установлено, что наиболее оптимальным режимом вибрационной обработки жидкого полимерного связующего является частота колебаний 100 Гц при амплитуде колебаний 60 мкм, так как при реализации именно такого режима виброобработки связующего наблюдаются максимальные значения исследуемых прочностных показателей изготавливаемого стеклопластика.

3. Обработка стеклопластика Этал Т 210-Т11-ГВС9, выполненного из предварительно виброактивированного связующего, обеспечивает получение более высокого качества поверхности, что подтверждается фактом снижения параметров шероховатости обработанной поверхности модифицированного стеклопластика до 2 раз по сравнению с поверхностью стандартного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленеv, Ю. В. Прогнозирование изменения физических свойств полимерных материалов при разных способах их модификации / Ю. В. Зеленеv, В. И. Хромов // Пластические массы. – 2002. – № 11.
2. Еренков, О. Ю. Исследование механических свойств ПКМ в зависимости от предварительного электрофизического воздействия на связующее / О. Ю. Еренков, П. В. Игумнов, В. Л. Никищечкин // Известия ОрелГТУ. – 2009 – № 3-2/275(561). – С. 561.
3. Еренков, О. Ю. Исследование эффективности влияния предварительной электрофизической обработки связующего на прочностные характеристики ПКМ / О. Ю. Еренков, В. Л. Никищечкин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № I-1(2). – С. 99-104.



Проценко А. Е., Малышева Д. П., Петров В. В., Шпилев А. М.
A. E. Protsenko, D. P. Malysheva, V. V. Petrov, A. M. Shpilev

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЭНДВИЧ-КОНСТРУКЦИЙ

STUDY OF THE EFFECT OF THERMAL TREATMENT ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SANDWICH STRUCTURES

Проценко Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии переработки нефти и полимеров Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: protsenko.ae@yandex.ru.

Mr. Alexander E. Protsenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Technology of oil and polymer processing, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: protsenko.ae@yandex.ru.

Малышева Дарья Павловна – аспирант кафедры технологии самолётостроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: daryareshet@mail.ru.

Ms. Daria P. Malysheva – a post-graduate student, Department of airplane technology, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: daryareshet@mail.ru.

Петров Виктор Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии переработки нефти и полимеров Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: petrovpng@mail.ru.

Mr. Victor V. Petrov – Dr.hab. of Engineering, Professor, Department of Technology of oil and polymer processing, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: petrovpng@mail.ru.

Шпилев Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Shpilev@knastu.ru.

Mr. Anatoly M. Shpilev – Dr.hab. of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Shpilev@knastu.ru.

Аннотация. В статье представлены данные экспериментального исследования влияния термической обработки на физико-механические свойства сэндвич-конструкций. Сэндвич-конструкции были получены с использованием метода VaRTM. Термическая обработка проводилась при значениях температуры, равных 80 °С и 60 °С при различном времени выдержки. Были проведены испытания разрушающего контроля сэндвич-конструкций и стеклопластиков. Полученные данные коррелируют с результатами исследований степени набухания отверждённых связующих. Исследования структуры стеклопластиков показывают, что при термообработке происходит трансформация надмолекулярной структуры полимерной матрицы.

Summary. The article presents the data of an experimental study heat treatment influence on the physical and mechanical properties of cured samples of sandwich structures. The sandwich structures were made using VaRTM method. Heat treatment at 80 °C and 60 °C leads to increase in the bending strength. The tests of destructive control of sandwich structures and fiberglass plastics have been carried out. The SEM micrographs of the microstructures of fiberglass reinforced plastic samples show that during heat treatment there is a structural refinement of the polymer matrix. The results correlate with the data of swelling of the cured binder.

Ключевые слова: сэндвич-конструкции, полимерный композиционный материал, прочность, набухание, сканирующая электронная микроскопия, эпоксивинилэфирное связующее, термическая обработка.

Key words: sandwich structures, polymer composite material, strength, swelling, scanning electron microscopy, epoxy vinyl ester binder, heat treatment.

УДК 678.5.046

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе термореактивных связующих широко используются в различных отраслях. Это связано с их низкой плотностью по сравнению с металлами, высокой прочностью в направлении армирования, высокой коррозионной стойкостью, а также низкими эксплуатационными расходами этих конструкций и изделий из таких материалов.

Около 80 % современных пассажирских самолётов выполнены из трёхслойных сотовых панелей из-за их относительно высокой удельной прочности и жёсткости по сравнению с традиционными монолитными конструкциями. Технология изготовления ускоренного формования сэндвич-панелей сочетает в себе преимущества вакуума и прессования [1].

Сэндвич-конструкции широко используются в судостроительной промышленности. В авиаконструкциях эти материалы позволяют уменьшить вес конструкций, а также увеличить плавучесть [3, 4].

В публикациях [5; 6] рассматривается инженерная технология конструкций из полимерных композиционных материалов, которые успешно применяются при строительстве современных судов.

При изготовлении крупногабаритных конструкций из панелей среднего слоя наиболее оптимальными являются безавтоклавные методы – вакуумная инфузия (VaRTM) для изделий нестандартной конфигурации и малой серии и инжекционный метод низкого давления (light-RTM) для типовых изделий [2]. Важную роль при использовании этих методов играют технологические параметры: время жизни связующего, температура окружающей среды, время выдержки под вакуумом, а также время и температура постотверждения.

Методика исследования

Исследование проводилось на панелях среднего слоя, представляющих гофрированный элемент, образованный пенопластовыми вкладышами (см. рис.1). Гофрированный элемент выполнен из стеклопластика на основе трёх слоёв полотняной ткани Ст-62004 (ХКК Композит) с нулевым углом армирования и эпоксивинилэфирного не предускоренного связующего Dion 9300 FR (Reich Hold). Формообразующие вкладыши изготавливались из поливинилхлоридного пенопласта Divinycell H35 высотой 40 мм.

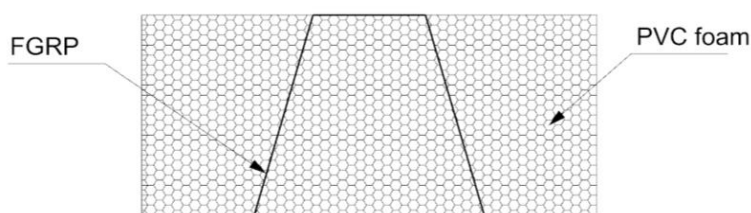


Рис. 1. Образец среднего слоя

Все образцы получали методом вакуумной инфузии. Связующее изготавливалось из четырех компонентов по рецептуре: Dion 9300 FR – 100 масс. ч., Accelerator NORPOL 9802 – 3 масс. ч., Peroxide NORPOL № 11 – 2 масс. ч., Inhibitor NORPOL 9854 – 0,01 масс. ч. Время жизни смеси при нормальных условиях составляет 120 – 150 минут.

Отверждение стеклопластика проводилось в вакууме (0,01 МПа) при комнатной температуре в течение 6 часов. Выдержка изделия при комнатной температуре с целью достижения полной

полимеризации образцов проводилась в течение 10 дней. В дальнейшем образцы подвергались термической обработке при 60 °С в течение 5, 10, 15 часов и при 80 °С в течение 4, 8, 12 часов.

Для исследования структуры эпоксивинилэфирных связующих методом набухания использовались отверждённые образцы толщиной 10 мм и 10 мм в диаметре.

Начальную массу (m_0) определяли на аналитических весах. Один образец использовали как контрольный, а другие образцы подвергали термообработке в сушильном шкафу при 80 °С.

По завершении термообработки все образцы погружали в растворитель, состоящий из ацетона 33 %, циклогексанона 33 % и толуола 34 %. Через 24 часа образцы вынимали, остаточный растворитель удаляли фильтровальной бумагой, после чего их взвешивали для определения массы набухшего образца (m). Измерения продолжались до тех пор, пока масса не перестала изменяться.

Степень набухания (α) для каждого образца рассчитывается согласно формуле

$$\alpha = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \%,$$

где α – степень набухания; m – масса набухшего образца; m_0 – начальная масса.

Механические испытания проводились на испытательной машине INSTRON 3382, твёрдость исследовалась по методу Бринелля на приборе TIME Group Inc. TH600.

Результаты исследования

Из полученных экспериментальных данных следует, что термическая обработка приводит к увеличению несущей способности сэндвич-конструкций (см. рис. 2). При термообработке образцов при температуре 60 °С нагрузка, приводящая к разрушению образца, линейно возрастает на 14 % при пятичасовой выдержке и повышается на 27 % при пятнадцатичасовой. Термообработка при 80 °С в течение 4 часов способствует резкому увеличению несущей нагрузки сэндвич-конструкции на 30,7 %, дальнейшая обработка при этой температуре приводит к незначительному увеличению предела прочности – на 34,8 %.

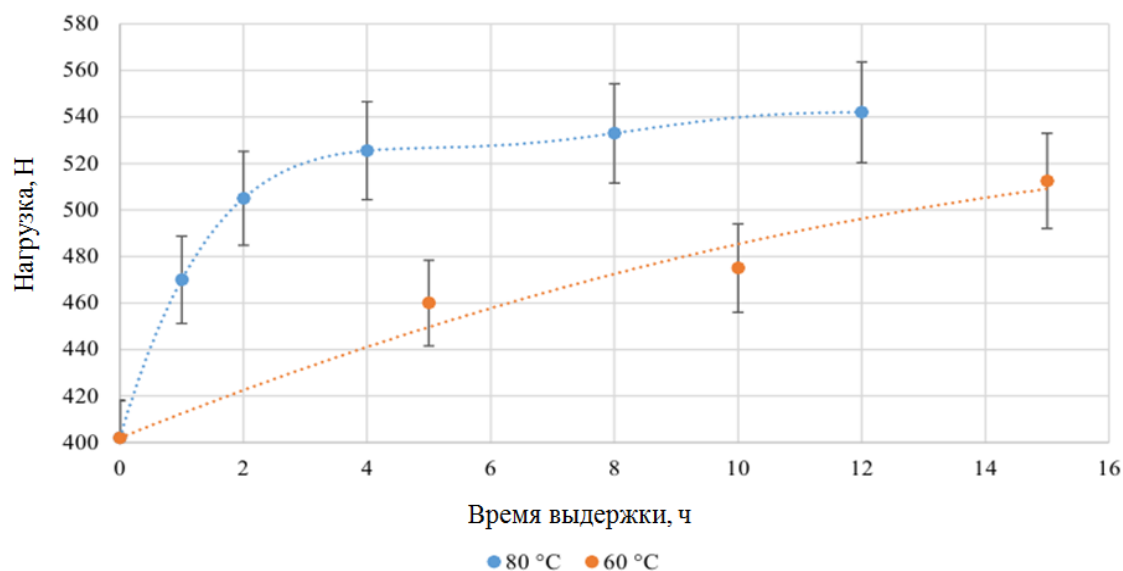


Рис. 2. Зависимость предельной нагрузки от времени и температуры выдержки

По данным визуального контроля излома образцов (см. рис. 3) следует, что образцы без термообработки при трёхточечном изгибе разрушаются по краю адгезионного слоя пенопласт-стеклопластик, что свидетельствует о недостаточной прочности клеевого соединения на границе между пенопластовым наполнителем и стеклотканью гофрированного слоя. Разрушение термообработанных образцов происходит по пенопластовому наполнителю. Это показывает, что при тер-

мообработке происходит упрочнение клеевого слоя за счёт протекания окончательного отверждения эпоксивинилэфирного связующего при повышенных температурах.

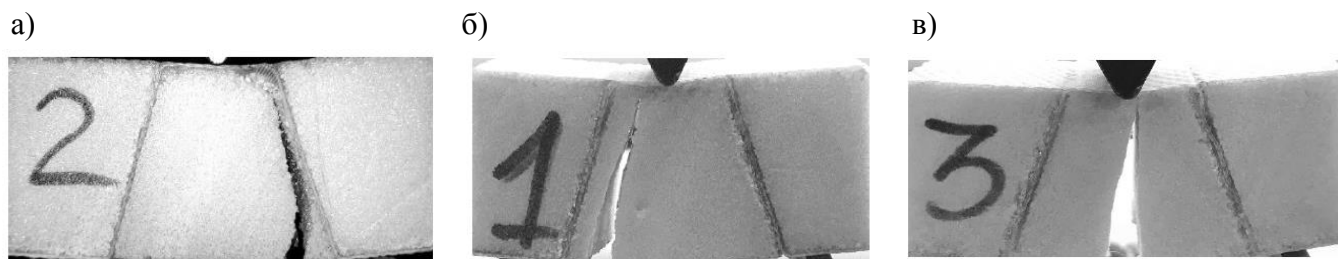


Рис. 3. Фотографии испытанных образцов при разном времени экспозиции:
 а – без термообработки; при термообработке (80 °С):
 б – при 2-часовой выдержке; в – при 4-часовой выдержке

В то же время были проведены испытания стеклопластиков, полученных вакуум-инфузионным методом, что и сэндвич-конструкции. Данные механических испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механические испытания стеклопластиков

Образец	Твёрдость, НВ	Изгиб, σ_b [МПа]	Предел прочности, σ_t [МПа]
Стеклопластик	44,6	487,9	467,9
Термообработанный стеклопластик	48,1	831,9	831,9

Таким образом, результаты проведённых испытаний показывают, что термообработка стеклопластика приводит к значительному увеличению его механических характеристик.

Представленные данные были также подтверждены исследованием набухания термообработанных образцов (см. рис 4).

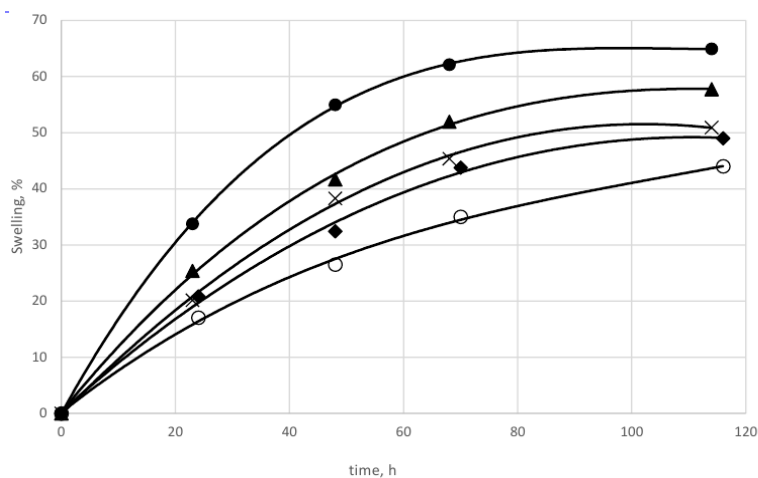


Рис. 4. Влияние термообработки на набухание

В результате термообработки степень набухания уменьшается на 7 %, а при 4-часовой выдержке этот параметр уменьшается на 14 %. Восьмичасовая и двенадцатичасовая выдержка для образцов приводит к снижению набухания на 16 % и 21 % соответственно. Полученные данные указывают на процесс постотверждения, протекающий при высокой температуре и приводящий к увеличению количества поперечных связей в полимере. Это препятствует проникновению молекул растворителя внутри трёхмерной решётчатой структуры отверждённой макромолекулы.

Фрактограммы образцов стеклопластика, представленные на рис. 5, показывают, что в процессе термической обработки происходит измельчение структуры полимерной матрицы, приводящее к закономерному уменьшению толщины ламелей вследствие протекания процессов сшивки при выдержке полимеров в условиях повышенной температуры.

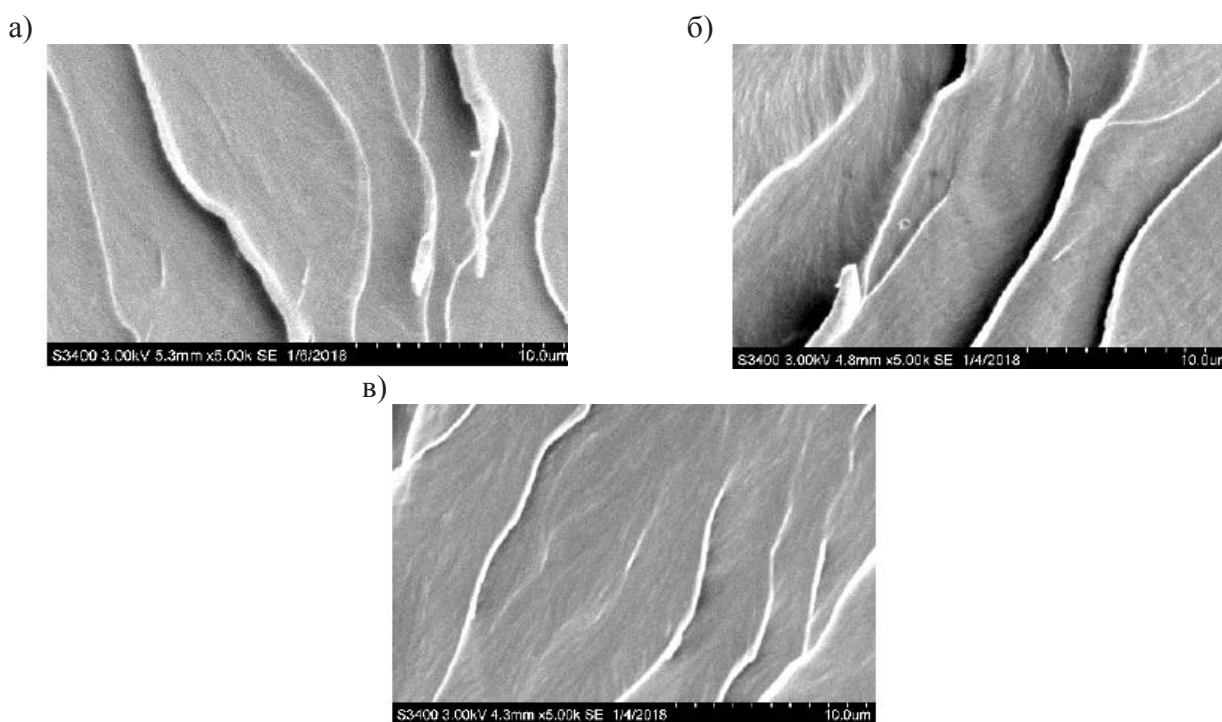


Рис. 5. Структура стеклопластиков:

а – без термообработки; при термообработке (80 °С): б – при 4-часовой выдержке;
в – при 8-часовой выдержке

Заключение

1. Термообработка ПКМ является обязательной технологической операцией, обеспечивающей повышение прочности за счёт протекания процессов постотверждения эпоксивинилэфирного связующего. По данным экспериментальных исследований, оптимальной является обработка композиционного материала при температуре 80 °С в течение 4 часов. Максимальное напряжение при изгибе термообработанного стеклопластика увеличилось на 76 %, а максимальное напряжение при растяжении – на 78 %.

2. В процессе термической обработки ПКМ происходит измельчение структуры полимерной матрицы, приводящее к закономерному уменьшению толщины ламелей вследствие протекания процессов сшивки при выдержке полимеров в условиях повышенной температуры.

3. Степень набухания ПКМ закономерно снижается пропорционально времени термообработки, что также является следствием увеличения числа поперечных связей в полимерной матрице.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология ускоренного формования трёхслойных сотовых панелей интерьера самолёта / Е. А. Вешкин, В. И. Постнов, О. Б. Застрогина, Р. А. Сатдинов / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 44.
2. Булкин, В. А. Применение перспективных композиционных материалов в надводном судостроении / В. А. Булкин, Н. Н. Федонюк, А. В. Шляхтенко. – Морской вестник. – 2013. – № 1. – С. 7-8.
3. Gullberg, O. Design and construction of GRP sandwich ship hulls. Marine Struct / O. Gullberg, K. A. Olsson. – 1990. – Vol. 3(2). – P. 93-109.
4. Karthikeyan, C. S. Investigation of bending modulus of fiber-reinforced syntactic foams for sandwich and structural applications. Polym. Adv. Tech / C. S. Karthikeyan, S. Sankaran. – 2007. – Vol. – 18(3). – P. 254-256.
5. Appolonov, E. M. Polymeric composite materials. Innovations in the industry, Innovations / E. M. Appolonov, N. N. Fedonyuk, V. M. Shaposhnikov. – 2013. – Vol. 181. – P. 18-20.
6. Mouritz, A. P. et al. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. Comp. Struct / A. P. Mouritz. – 2001. – Vol. 53(1). – P. 21-42.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ
EARTH SCIENCES AND LIFE SAFETY

Левин В. А., Алексанина М. Г., Дьяков С. Е., Еременко А. С., Казанский А. В.
V. A. Levin, M. G. Aleksanina, S. E. Dyakov, A. S. Eremenko, A. V. Kazansky

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДОРОЖЕК КАРМАНА В ОБЛАЧНОСТИ
ЗА КУРИЛЬСКИМИ ОСТРОВАМИ**

**INVESTIGATION OF CLOUD KÁRMÁN VORTEX STREETS BEHIND
THE KURIL ISLANDS**

Левин Владимир Алексеевич – доктор физико-математических наук, академик Российской академии наук, профессор, главный научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток). E-mail: levin@iacp.dvo.ru.

Mr. Vladimir A. Levin – Doctor of Physics, academician of RAS, professor, Chief Researcher of Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: levin@iacp.dvo.ru.

Алексанина Марина Георгиевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток). E-mail: margeo@mail.ru.

Mrs. Marina G. Aleksanina – Phd of Engineering, Senior Researcher of Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: margeo@mail.ru.

Дьяков Сергей Евгеньевич – младший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток). E-mail: sergdkv@gmail.com.

Mr. Sergey E. Dyakov – Junior Researcher of Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: sergdkv@gmail.com.

Еременко Александр Сергеевич – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток). E-mail: academy21@gmail.com.

Mr. Aleksandr S. Eremenko – Phd in Engineering, Junior Researcher of Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: academy21@gmail.com.

Казанский Александр Валентинович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток). E-mail: kazansky@iacp.dvo.ru.

Mr. Aleksandr V. Kazansky – Phd in Physics, Senior Researcher of Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: kazansky@iacp.dvo.ru.

Аннотация. В статье представлены результаты спутникового мониторинга атмосферных дорожек Кармана за Курильскими островами (весна 2012 года). Новизна работы состоит в том, что с использованием только временных пар спутниковых данных были рассчитаны основные гидродинамические параметры, определяющие структуру атмосферных дорожек Кармана. Это числа Рейнольдса, Струхала, Фруда, а также расчёты геометрических параметров и скорость перемещения вихрей по последовательности спутниковых изображений. При проведении расчётов характерный размер препятствия выбирался на высоте верхней границы слоя инверсии по вертикальному профилю температуры атмосферы. Сделано сравнение с широко применяемым подходом «разделяющей линии потока», выделяющей горизонтальное обтекание через препятствие. Показано хорошее соответствие высот физике процесса генерации вихрей, но при этом оценки высот имеют значительные разбросы.

Summary. The paper presents results of satellite monitoring of atmospheric vortex streets behind the Kuril Islands on the spring of 2012. The main hydrodynamic parameters determining the structure of Kármán atmospheric streets were calculated using satellite data. These are the Reynolds, Strouhal, and Froude numbers as well as the calculation of geometric parameters and the speed of vortex drift on a sequence of satellite images. The obstacle typical sizes were chosen at the height of the inversion layer over island boundaries based on vertical atmospheric tem-

perature profiles. We compared the results with the widely used approach of «dividing-streamline» the horizontal flow around an obstacle. A good overall agreement of heights with the physics of vortex generation process was shown, but the estimates of heights revealed considerable variations.

Ключевые слова: дорожки Кармана, спутниковые изображения, числа Струхали и Рейнольдса, частота срыва вихрей, скорость перемещения вихрей.

Key words: Kármán streets, satellite images, Strouhal and Reynolds numbers, vortex shedding frequency, vortex drift speed.

УДК 53.043:532.527

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 14-50-00034 в части исследования струйно-вихревых образований атмосферы и океана, а также Программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности» на 2018 год. При её выполнении использованы информационные ресурсы Центра коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН.

Введение

Цепочка вихрей, которая наблюдается при обтекании жидкостью или газом протяжённых цилиндрических тел с продольной осью, перпендикулярной направлению движения сплошной среды, называется вихревой дорожкой Кармана в честь Теодора фон Кармана, который впервые описал этот процесс в 1912 году [26]. Явление можно наблюдать лишь при ограниченных значениях числа Рейнольдса. Размеры дорожки зависят от размера обтекаемого тела, при этом существует линейная зависимость между шириной дорожки и расстоянием между соседними вихрями [3; 5].

Основная часть исследований облачных дорожек Кармана опирается на модельные расчёты и результаты лабораторных исследований [10; 11; 12; 15; 16; 20; 22; 23 27;]. Большое количество работ посвящено облачным дорожкам Кармана за островом Мадейра в Северо-Восточной Атлантике [7; 9; 17; 19]. В северо-западной части Тихого океана облачные дорожки Кармана регулярно наблюдаются за островом Чеджу [8; 14; 15; 21; 25;]. Несмотря на достаточно большое количество работ по данной теме, исследования единого понимания механизма образования облачных дорожек Кармана в природных условиях всё же нет.

В районе Курильских островов облачные вихревые дорожки Кармана наблюдаются редко. Однако за 15-16 апреля 2012 г. на спутниковых изображениях наблюдалось до 9-10 облачных дорожек Кармана разного масштаба. Почти при одних и тех же условиях ветра и состояния атмосферы можно было наблюдать разнообразие форм и поведения облачных дорожек Кармана.

Имеющиеся спутниковые наблюдения в рассматриваемых случаях позволили провести расчёты основных геометрических и гидродинамических параметров, ответственных за образование вихревых цепочек в атмосфере. В данной статье представлены результаты проведённых измерений и расчётов.

Объекты и данные

Курильские острова – цепь вулканических островов между полуостровом Камчатка и островом Хоккайдо. За 16 апреля 2012 г. на спутниковых изображениях наблюдалось около 10 облачных дорожек Кармана разного масштаба (см. рис. 1.) При имеющемся разрешении (1,1 км радиометр AVHRR/NOAA и 250 м радиометр MODIS/AQUA) наиболее чётко наблюдались облачные вихревые дорожки Кармана за четырьмя островами средней Курильской гряды – о. Матуа, о. Расшуа, о. Кетой и о. Симушир. Минимальный интервал времени между спутниковыми наблюдениями составил 13 минут.

Для расчёта вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы по данным радиометров ATOVS (спутники NOAA-15,-18,-19) использовались адаптированные под параллель-

ную обработку программные пакеты Европейского космического агентства – AAPP, RTTOV и MetOffice-1Dvar. Профили рассчитываются на 43 стандартных уровнях по вертикали. Для каждой точки в зависимости от географических координат и времени года определяется наиболее подходящее стандартное начальное приближение профиля из имеющихся в пакете RTTOV. Отби- рались только профили, прошедшие жёсткий контроль по точности.

Для расчёта скорости набегающего потока воздуха использовался усовершенствованный кросскорреляционный метод построения перемещений облачных маркеров по последовательности спутниковых изображений [1]. Предполагалось, что скорость потока постоянна по вертикали от поверхности до верхней границы инверсии. Параметры вихревых дорожек и смещения отдель- ных вихрей рассчитывались по изображениям визуально.

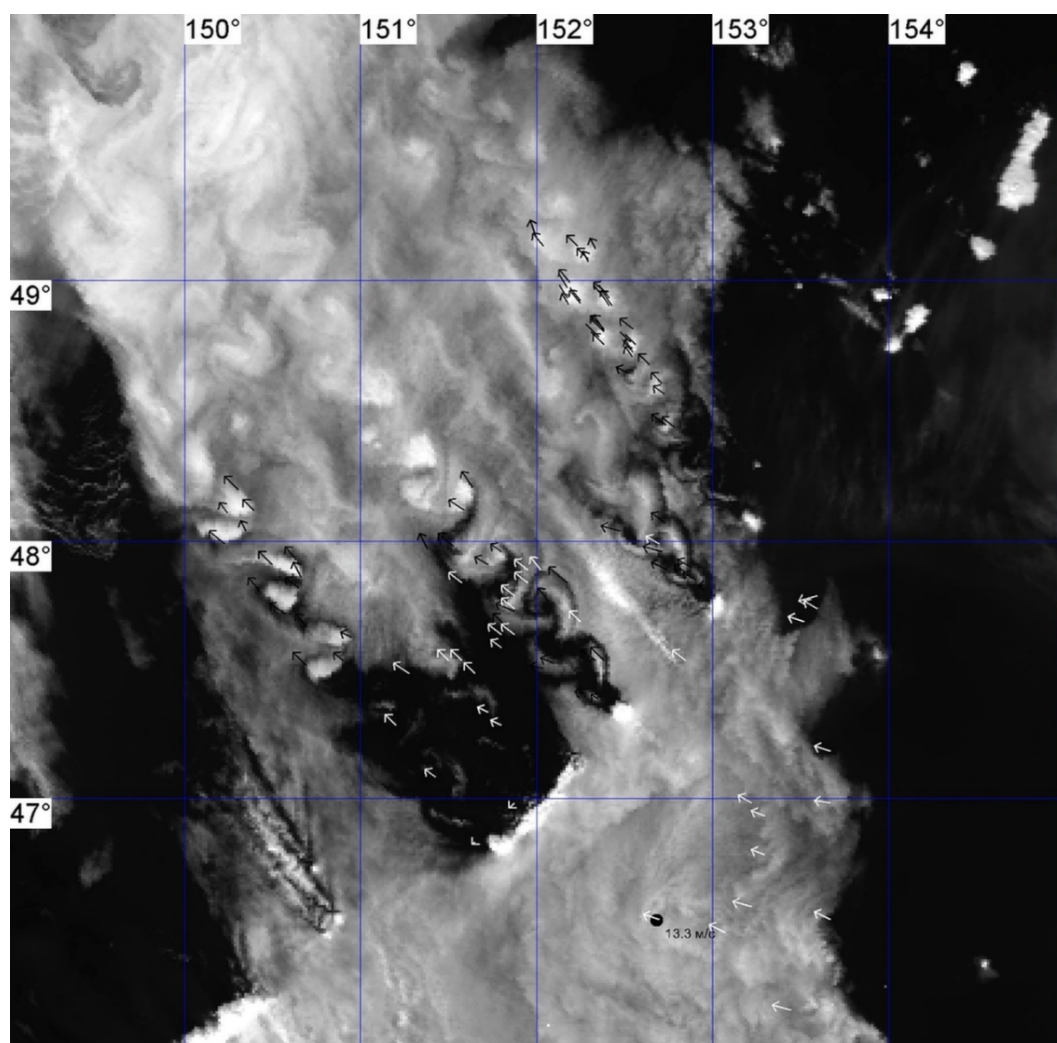


Рис. 1. Курильские острова по состоянию на 16 апреля 2012 г.:
видимый канал NOAA-19/AVHRR – время UTC 02:49. Показаны скорости перемещений
облачности, рассчитанные автоматически (белые стрелки) и скорости смещения отдельных
вихрей, рассчитанные визуально (тёмно-серые стрелки)

Используемые методы

В реальной атмосфере облачные вихревые цепочки чаще всего наблюдаются за вулканиче- скими островами в море и образуются в тех случаях, когда нижний слой атмосферы ограничен сверху выраженной инверсией, располагающейся гораздо ниже вершины острова или гребня хребта [11]. Инверсия препятствует обтеканию препятствия сверху, в результате чего реализуется в основном боковое обтекание. Предполагается существование границы раздела двух типов обте-

кания препятствия, уровень которой назван *dividing streamline* и который лежит выше уровня инверсии. В атмосфере при наличии сильной стратификации и достаточно выраженной инверсии, а также, если препятствие достаточно высоко, следует ожидать отрыва вихрей. В этих условиях поток ниже линии деления вынужден обогнуть остров в почти горизонтальной плоскости с возможным образованием вихрей с вертикальной осью. Индикаторами этого режима являются безразмерные числа Рейнольдса и Струхала. Чтобы их рассчитать, требуются оценки параметров ветра и характерного размера препятствия d .

Безразмерной частотой генерации вихрей является число Струхала St , которое связано с числом Рейнольдса для потока, порождающего след от препятствия [6]. Основным соотношением для вихрей дорожки Кармана является то, что это число зависит только от единственной безразмерной величины – параметра подобия, называемого числом Рейнольдса Re [2]:

$$Re = \rho V_w \frac{d}{\mu}, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды; V_w – скорость набегающего на препятствие потока; d – линейный размер препятствия; μ – коэффициент её динамической вязкости.

Значения числа Струхала для препятствия в виде кругового цилиндра в так называемой за- критической области ($Re \gg 10^7$) у разных исследователей отличается и соответствует диапазону 0,22...0,30 [6; 4]. Строго говоря, лабораторные эксперименты, которые соответствовали бы нашим случаям, когда $Re \sim 10^{10}$, отсутствуют, так как не генерируются состояния, когда $Re \gg 10^7$, поэтому придётся ориентироваться на эти оценки.

Число Струхала связано с частотой срыва вихрей f соотношением [19]

$$S_t = f \frac{d}{V_w}, \quad (2)$$

где f – частота вихреобразования; d – характерный линейный размер препятствия; V_w – скорость набегающего потока.

Зная число Струхала, можно рассчитать частоту вихреобразования:

$$f \approx \frac{(S_t V_w)}{d}. \quad (3)$$

С другой стороны, частота вихреобразования определяется через скорость смещения вихрей V_v [19]:

$$f \approx \frac{V_v}{a}, \quad (4)$$

где a – расстояние между вихрями одного знака вращения. При наличии последовательности спутниковых изображений с временным интервалом, за которым облачность сохраняет свою структуру, можно рассчитать (по перемещению центров) скорости смещений вихрей V_v , скорость набегающего потока V_w и остальные геометрические характеристики вихревых цепочек – поперечный размер b и расстояние между двумя вихрями одного знака вращения a (см. рис. 2). В таком случае можно получить соотношения, позволяющие напрямую вычислить число Струхала St :

$$S_t \approx \frac{(V_v d)}{(a V_w)} \approx \frac{V_v d}{V_w a}. \quad (5)$$

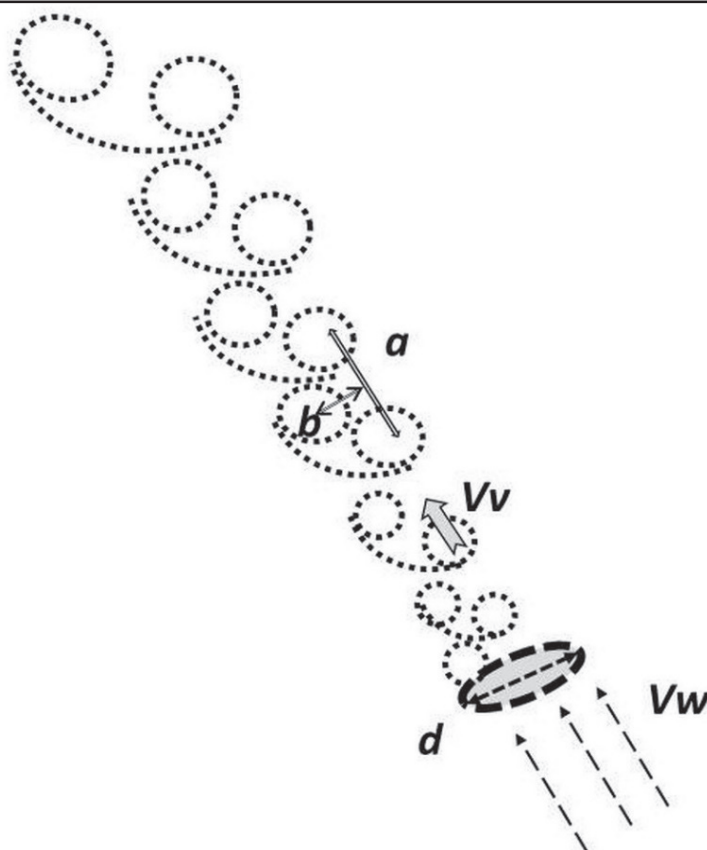


Рис. 2. Схема динамики облачной дорожки Кармана над островом:
 V_w – набегающий на остров поток; V_v – скорость смещения вихрей дорожки;
 a – расстояние между ближайшими вихрями одного знака вращения; b – поперечный размер дорожки; d – характерный размер препятствия

Результаты измерений и расчётов

Для расчёта безразмерного числа Рейнольдса Re величина относительной плотности воздуха бралась как $\rho = 1,019 \text{ кг/м}^3$, а величина вязкости воздуха μ – как $1,68 \times 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Эти величины можно считать постоянными по пространству и времени. Построенные для исследуемых островов вертикальные профили температуры над Курильскими островами – Матуа, Расшуа, Кетой и Симушир – за 16 апреля 2012 г. показали наличие инверсии на высоте значительно меньшей, чем высота вулканических островов (см. рис. 3).

Характерным размером препятствия d была принята ширина поперечного к потоку профиля острова на высоте, которая соответствует верхней границе инверсии. Для этого были построены профили островов, перпендикулярные потоку, по данным спутниковой топографии (<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) с пространственным разрешением 90 м.

Оценка высоты верхней границы инверсии получалась следующим образом. В слое инверсии температура была почти постоянной, а выше слоя наблюдалось её почти линейное уменьшение. Пересечение линейной аппроксимации температуры выше слоя инверсии с вертикальной линией постоянной температуры в слое инверсии дало высоту верхней кромки для Курильских островов. Высоты на Курильских островах были почти идентичны и незначительно колебались около уровня, соответствующего 520 м. Для каждого острова профили в набегающем потоке перед ним и сразу за ним были почти идентичны и отличались только незначительной сдвижкой по шкале температуры – около $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ (за островом значение температуры было выше).

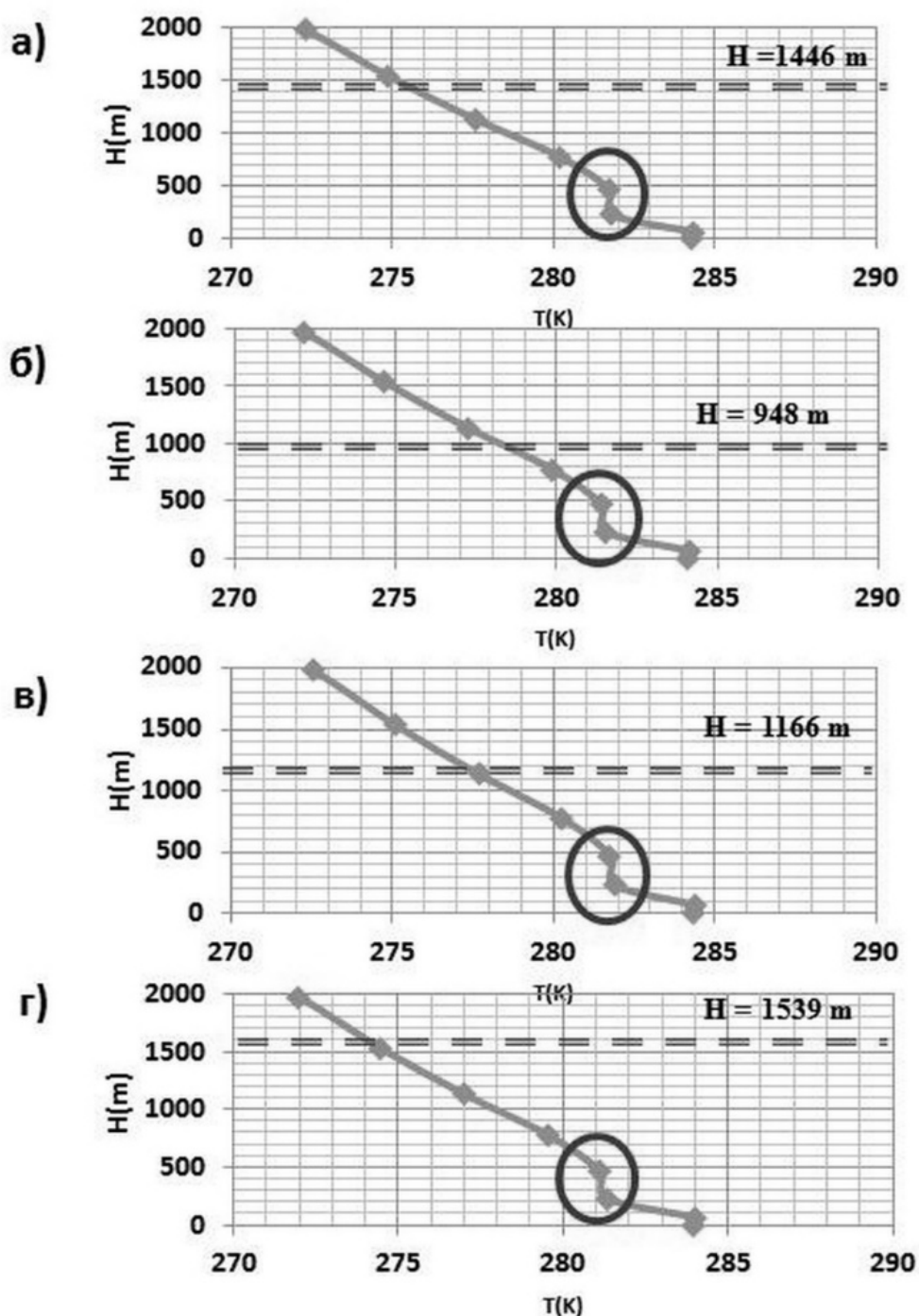


Рис. 3. Максимальные высоты и атмосферные профили температуры перед островами по состоянию на 16 апреля 2012 г.: а – Матуа; б – Расшуа; в – Кетой; г – Симушир

Частота вихреобразования f определяется согласно формуле (4) через скорость смещения вихрей V_v и расстояние между двумя вихрями одного знака вращения a [19]. Частоты f рассчитывались для пар вихрей, взятых в разных местах дорожек. В расчётах использовались только максимальные частоты, которые наблюдались сразу за островами. Характеризующие стабильность вихревых цепочек – числа Рейнольдса и Струхала – рассчитывались согласно соотношению (5). В табл. 1 приведены значения чисел Рейнольдса и Струхала, вычисленные для полученных значений характерного диаметра препятствия. В одном случае диаметр d_{inv} брался на высоте H_{inv} темпе-

ратурной инверсии атмосферного профиля, а в другом случае d_{hc} брался на высоте H_{hc} раздвоения потока, преодолевающего препятствие.

Таблица 1

Число Струхала St и Рейнольдса Re , характерный размер препятствия d по высоте инверсии температуры h_{inv} и высоте линии, разделяющей поток h_c

Острова	V_w , m/s	V_v , m/s	a , km	h_{inv} , m	d_{inv} , m	St_{inv}	$Re_{inv} \times 10^{10}$	h_c , m	d_{hc} , m	St_{hc}	$Re_{hc} \times 10^{10}$
Матуа	14	8,49	12	525	3683	0,18	0,31	578	3570	0,18	0,30
Расшуа	14	11,15	16	525	5000	0,24	0,42	305	10252	0,51	0,87
Кетой	14	8,75	13	525	5420	0,26	0,46	512	5486	0,26	0,46
Симушир	14	8,03	19	525	6800	0,20	0,57	712	5676	0,17	0,48

Из табл. 1 видно, что число Струхала St в большинстве случаев меньше величин диапазона, соответствующего закритичным числам Рейнольдса, то есть при $Re > 10^7$ число St принимает величину в пределах 0,22...0,3. Вероятно, это связано с не совсем корректной оценкой характерного размера препятствия. Вихри формируются в слое от поверхности до верхней границы инверсии, поэтому в качестве эффективного диаметра препятствия d необходимо использовать некоторый характерный размер, расположенный ниже слоя инверсии.

Были проведены сравнения высот инверсии с высотой h_c линии воздушного потока, отделяющей горизонтальное обтекание от потока через препятствие. Расчёты проводились по формулам, приведённым в работе [11]. С использованием вертикальных профилей температуры производились расчёты потенциальной температуры θ . После этого рассчитывалась частота Вэйсяля – Брента N для каждого уровня высоты z , представленного в вертикальных профилях:

$$N = \left(\frac{g\delta\theta}{\theta_0\delta z} \right), \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения; θ_0 – средняя потенциальная температура в слое, для которого считается баланс (7). С использованием рассчитанной скорости набегающего потока V_w , высоты препятствия (высоты острова), частоты Вэйсяля – Брента для получения характерной высоты потока h_c был произведён расчёт интеграла согласно выражению, представленному [24]:

$$\frac{1}{2} V_w^2 (h_c) = \int_{h_c}^H N^2(z)(H-z) dz. \quad (7)$$

Так как высота h_c является неизвестной, то её вычисление производится путём подбора h_c до совпадения левой и правой частей интеграла. После получения высоты h_c производилось вычисление числа Фруда [24] для каждого из островов:

$$Fr = 1 - \frac{h_c}{H}. \quad (8)$$

С использованием атмосферных профилей и скорости набегающего потока для каждого случая были вычислены числа Фруда и высоты, на которых происходит расщепление потоков. Атмосферные профили для Курильских островов идентичны по пространству и имеют фактически

одну и ту же высоту верхнего уровня инверсии – 520 м. Разумно ожидать, что и линия разделения потоков также будет иметь одну и ту же высоту. Однако разброс h_c значительный (300...700 м). В то же время средняя величина h_c близка к величине верхней границы инверсии. По-видимому, это идентичные величины, но оценка по температурным профилям атмосферы более надёжна.

Обсуждение и заключение

Для классических вихревых дорожек, образующихся при обтекании круглого цилиндра, известны 6 режимов, определяемых величиной числа Рейнольдса, лежащей в диапазоне 0...10⁷ [18]. При числах Рейнольдса свыше 10⁷ возникает закритическая область турбулентности, которая также характеризуется наличием вихревой дорожки, но для которой геометрические соотношения классических дорожек Кармана могут не выполняться.

В данной работе впервые представлено исследование по спутниковым данным облачных дорожек Кармана за Курильскими островами. Это исследование подтверждает точку зрения о том, что образование облачных дорожек Кармана обусловлено наличием инверсии в вертикальном профиле температуры атмосферы. В данном случае препятствие оказывается цепочкой изолированных островов. Образуются именно дорожки Кармана, в противном случае наблюдался бы описанный в работе [28] турбулентный след за сеткой.

Анализ полученных табличных значений (см. табл. 2) и графиков (см. рис. 4) показывает, что наиболее устойчивыми (длинными, стабильными по размеру вихрей и скорости их перемещения) и соответствующих классическим дорожкам Кармана по соотношению поперечных размеров к продольным b/a являются вихревые дорожки за островами Матуа и Кетой.

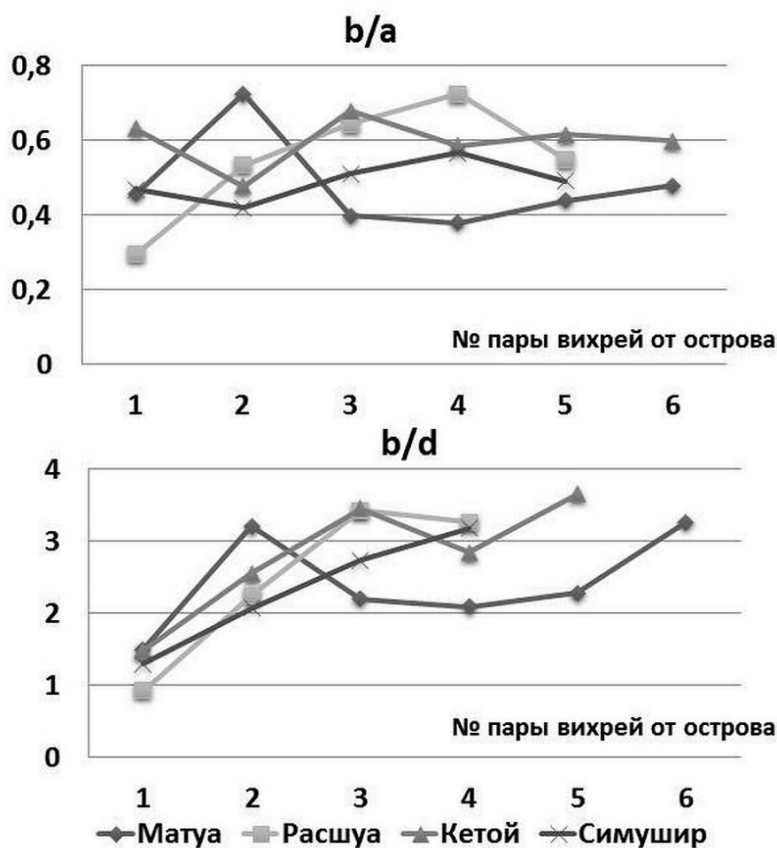


Рис. 4. Отношение поперечного размера к продольному размеру (b/a) и поперечного размера к характерному диаметру препятствия (b/d), взятому на высоте температурной инверсии атмосферного профиля в облачных вихревых цепочках на Курилах по состоянию на 16 апреля 2012 г.



Отношение поперечных размеров к продольным b/a лежит в пределах 0,4...0,6. Отношение поперечного размера к характерному диаметру препятствия b/d , где d берётся по высоте верхней кромки температурной инверсии, также согласуется с результатами других исследований на других вулканических островах [13] и лежит в пределах 0,9...2,45. Такое соотношение геометрических параметров вихревых цепочек не соответствует классическим отношениям дорожек Кармана при числе Рейнольдса до 200 ($Re < 200$). В закритической области турбулентности при числах Рейнольдса свыше 10^7 должны быть другие соотношения. Кроме того, заниженные значения числа Струхалья, которые являются показателем частоты срыва вихрей, указывают на то, что характерный диаметр d препятствия надо брать ниже линии температурной инверсии атмосферного профиля.

Таблица 2

Геометрические соотношения вихревых цепочек: отношение поперечного размера к продольному (b/a) и отношение поперечного размера к характерному диаметру препятствия (b/d) (d берётся по высоте температурной инверсии)

Острова	b/a	b/d
Матуа	0,45	1,49
Расшуа	0,29	0,92
Кетой	0,63	1,47
Симушир	0,46	1,29

Случай от 16 апреля 2012 г. на Курильских островах интересен тем, что при идентичности набегающих на острова потоков наблюдается разнообразие форм облачных вихревых цепочек. С использованием только данных спутникового мониторинга для вихревых атмосферных дорожек за островами Курильской гряды в северо-западной части Тихого океана 16 апреля 2012 г. были рассчитаны величины частот вихреобразования, числа Струхалья и Рейнольдса – основные гидродинамические параметры. Для их расчёта оценивались характерные размеры препятствия двумя способами. Первый основан на расчёте высоты линии разделения потока dividing streamline h_c [11] и оценке горизонтального размера вертикального сечения острова на этой высоте d_{hc} . Второй основан на расчёте высоты верхней кромки слоя инверсии по спутниковым атмосферным вертикальным профилям температуры с оценкой аналогичного характерного размера острова.

Атмосферные профили для Курильских островов идентичны по пространству и имеют фактически одну и ту же высоту верхнего уровня инверсии. Эта высота почти совпала со средней высотой h_c , что указывает на возможную идентичность этих двух способов. Однако из-за значительного разброса величин h_c на Курильских островах первый способ менее надёжен. Острова ниже верхнего уровня слоя инверсии h_{inv} дорожки не генерировали.

Вихревые дорожки, по-видимому, формируются в слое инверсии, и характерный размер препятствия должен соответствовать размеру сечения на высоте ниже верхней границы слоя инверсии, но выше основания острова. На это косвенно указывают числа Струхалья, которые меньше соответствующих оценок для закритических чисел Рейнольдса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексанин, А. И. Автоматический расчёт скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений / А. И. Алексанин, М. Г. Алексанина, А. Ю. Карнацкий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – № 2. – С. 131-142.
2. Ареф, Х. Вихревая динамика волновых следов / Х. Ареф // Нелинейная динамика. – 2006. – Т. 2. – №. 4. – С. 411-424.
3. Кочин, Н. Е. О неустойчивости вихревых цепочек Кармана / Н. Е. Кочин // Доклады АН СССР 24. – 1939. – №. 1. – С. 18.
4. Achenbach, E. On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers 6×10^3 to 5×10^6 / E. Achenbach, E. Heinecke // Journal of fluid mechanics. – 1981. – Vol. 109. – P. 239-251.

5. Batchelor, G. K. An introduction to fluid dynamics [Электронный ресурс] / G. K. Batchelor. – Cambridge university press, 2000. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511800955>.
6. Blevins, R. D. Flow Induced Vibration / R. D. Blevins. – Van Nostrand Reinhold Co. – 1990. – P. 451.
7. Caldeira, R. M. Wake response to an ocean-feedback mechanism: Madeira Island case study [Электронный ресурс] / R. M. Caldeira, R. Tomé // *Boundary-layer meteorology*, 2013. – Vol. 148. – №. 2. – P. 419-436. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s10546-013-9817-y>.
8. Chung, Y. S. Mountain-generated vortex streets over the Korea South Sea [Электронный ресурс] / Y. S. Chung, H. S. Kim // *International Journal of Remote Sensing*. – 2008. – Vol. 29. – №. 3. – P. 867-877. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1080/01431160701281080>.
9. Couvelard, X. et al. Wind mediated vorticity-generation and eddy-confinement, leeward of the Madeira Island: 2008 numerical case study [Электронный ресурс] / X. Couvelard // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. – 2012. – Vol. 58. – P. 128-149. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2012.09.005>.
10. Epifanio, C. C. The dynamics of orographic wake formation in flows with upstream blocking [Электронный ресурс] / C. C. Epifanio, R. Rotunno // *Journal of the atmospheric sciences*. – 2005. – Vol. 62. – №. 9. – P. 3127-3150. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1175/JAS3523.1>.
11. Etling, D. On atmospheric vortex streets in the wake of large islands [Электронный ресурс] / D. Etling // *Meteorology and Atmospheric Physics*. – 1989. – Vol. 41. – №. 3. – P. 157-164. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/BF01043134>.
12. Heinze, R. The structure of Kármán vortex streets in the atmospheric boundary layer derived from large eddy simulation [Электронный ресурс] / R. Heinze, S. Raasch, D. Etling // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2012. – Vol. 21. – №. 3. – P. 221-237. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0313>.
13. Horvath A. Inter-Comparison of WRF Model Simulated Winds and MISR Stereoscopic Winds Embedded within Mesoscale von Kármán Wake Vortices / A. Horvath, C. G. Nunalee, K. J. Mueller // *AGU Fall Meeting Abstracts*. – 2014.
14. Ito, J. Atmospheric Kármán Vortex Shedding from Jeju Island, East China Sea: A Numerical Study / J. Ito, H. Niino // *Monthly Weather Review*. – 2016. – Vol. 144. – №. 1. – P. 139-148.
15. Jensen, N. O. Vortex cloud street during AMTEX 75 / N. O. Jensen, E. M. Agee // *Tellus*. – 1978. – Vol. 30. – №. 6. – P. 517-523.
16. Kang, S. D. A numerical study on the Kármán vortex generated by divergence of momentum flux in flow past an isolated mountain / S. D. Kang, F. Kimura, S. Takahashi // *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*. – 1998. – Vol. 76. – №. 6. – P. 925-935.
17. Li, X. et al. A SAR observation and numerical study on ocean surface imprints of atmospheric vortex streets [Электронный ресурс] / X. Li // *Sensors*. – 2008. – Vol. 8. – №. 5. – P. 3321-3334. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/s8053321>.
18. Lienhard, J. H. Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders / J. H. Lienhard. – Technical Extension Service, Washington State University, 1966. – P. 300.
19. Nunalee, C. G. On the periodicity of atmospheric von Kármán vortex streets [Электронный ресурс] / C. G. Nunalee, S. Basu // *Environmental Fluid Mechanics*. – 2014. – Vol. 14. – №. 6. – P. 1335-1355. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s10652-014-9340-9>.
20. Rotunno, R. Further results on lee vortices in low-Froude-number flow / R. Rotunno, P. K. Smolarkiewicz // *Journal of the atmospheric sciences*. – 1991. – Vol. 48. – №. 19. – P. 2204-2211.
21. Ruscher, P. H. A numerical simulation of an atmospheric vortex street / P. H. Ruscher, J. W. Deardorff // *Tellus*. – 1982. – Vol. 34. – №. 6. – P. 555-566.
22. Schär, C. Vortex formation and vortex shedding in continuously stratified flows past isolated topography / C. Schär, D. R. Durran // *Journal of the atmospheric sciences*. – 1997. – Vol. 54. – №. 4. – P. 534-554.
23. Snyder, W. H., Thomson, R. S., Eskridge, R. E. The structure of strongly stratified flows over hills: Dividing streamline concept / W. H. Snyder, R. E. Lawson, I. P. Castro [and other] // *Journal of fluid mechanics*. – 1985. – Vol. 152. – P. 249-288.
24. Smolarkiewicz, P. K. Low Froude number flow past three-dimensional obstacles. Part I: Baroclinically generated lee vortices / P. K., R. Rotunno // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 1989. – Vol. 46. – №. 8. – P. 1154-1164.
25. Tsuchiya, K. The clouds with the shape of Kármán Vortex Street in the wake of Cheju Island, Korea / K. Tsuchiya // *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*. – 1969. – Vol. 47. – №. 6. – P. 457-465.
26. Von Kármán, T. Über den Mechanismus des Flüssigkeits- und Luftwiderstandes (On the mechanism of the resistance in fluids) / T. Von Kármán, H. Rubach // *Phys. Z.* – 1912. – №. 13. – P. 49-59.
27. Young, G. S. An observational study of vortex spacing in island wake vortex streets [Электронный ресурс] / G. S. Young, J. Zawislak // *Monthly weather review*. – 2006. – Vol. 134. – №. 8. – P. 2285-2294. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1175/MWR3186.1>.
28. Wu, J. Z. Vorticity and vortex dynamics / J. Z. Wu, H. Y. Ma, M. D. Zhou. – Springer Science & Business Media, 2007.