

Афанасьев Д. И., Дьячков А. В., Санников И. В.
D. I. Afanasyev, A. V. Dyachkov, I. V Sannikov

АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

ANALYSIS OF DEVELOPMENT TRENDS OF POWER SUPPLY SYSTEMS

Афанасьев Денис Игоревич – студент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681010, Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Аллея Труда, д. 59, кв. 241; тел. 8 (924) 3186109. E-mail: deffjoint.kms@mail.ru.

Mr. Denis I. Afanasyev – student, Electromechanics Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 59-241 Alleya Truda Str., Komsomolsk-on-Amur, Russia; tel. 8 (924) 3186109. E-mail: deffjoint.kms@mail.ru.

Дьячков Александр Викторович – студент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681000, Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Котовского, д. 3, кв. 215; тел. 8 (914) 1997198. E-mail: dyachkov-94@bk.ru.

Mr. Alexander V. Dyachkov – student, Electromechanics Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 3-215 Kotovskaya Str., Komsomolsk-on-Amur, Russia; tel. 8 (914) 1997198. E-mail: dyachkov-94@bk.ru.

Санников Иван Владимирович – студент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681000, Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Котовского, д. 3, кв. 215; тел. 8 (924) 2150622. E-mail: qwertyytrewq28@gmail.com.

Mr. Ivan V. Sannikov – student, Electromechanics Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 3-215, Kotovskaya Str., Komsomolsk-on-Amur, Russia; tel. 8 (924) 2150622. E-mail: qwertyytrewq28@gmail.com.

Аннотация. Повышение эффективности систем электроснабжения непосредственно связано с анализом направлений развития и совершенствования на этой основе их основных элементов. В статье приведены результаты анализа основных направлений исследований источников, потребителей и связывающих их элементов энергосистем. Целью анализа является определение перспективных типов элементов, выделение значимых проектно-конструкторских и эксплуатационных факторов, обеспечивающих заданные показатели качества электроэнергии. Проведено изучение возможностей теоретической базы, обеспечивающей создание и исследование структурированных моделей систем электроснабжения. Приведены примеры формирования структуры системы электроснабжения в виде распределенной генерирующей сети. Обоснованы требования и определены пути улучшения системных параметров как со стороны энергоснабжающих организаций, так и со стороны потребителей с учетом реальных параметров основных нагрузок. Показана возможность использования современных информационно-коммуникационных технологий и средств для мониторинга характерных параметров и режимов работы систем электроснабжения при эксплуатации.

Summary. Improving the efficiency of power supply systems is directly related to the analysis of development trends and improvement on the basis of their main elements. The article presents the analysis of research sources, consumers and power system elements that connect them. The purpose of the analysis is the identification of promising types of items, the selection of important design and operational factors that ensure the specified quality of electricity. A study of the possibilities of a theoretical framework, ensuring the creation and study of structured models of power supply systems is presented. The examples of creating the electricity system structure in the form of a distributed generating network are given. The authors justify requirements and define ways of improving the system parameters from the point of view of supplying organizations and consumers taking into account the actual parameters of the main loads. The article shows the possibility of using modern information and communication technologies and tools for monitoring characteristic parameters and modes of power supply systems in operation.

Ключевые слова: комплексная эффективность, микроГЭС, асинхронный двигатель, мониторинг.

Key words: integrated efficiency, microhydroelectric plant, asynchronous motor, monitoring.

УДК 658.26

Введение. Эффективность систем электроснабжения (СЭ) в большинстве случаев может быть рассчитана на основе частных показателей качества процессов генерации, транспортирования и потребления электроэнергии. Одной из основных причин снижения эффективности являются старение и износ элементов систем электроснабжения, а также деградация межструктурных связей.

Рассмотрение факторов, влияющих на эффективность СЭ, показывает, что их можно разделить на три группы: проектные, технологические и эксплуатационные. При отсутствии явных дефектов проектирования, изготовления, применения, а также соответствующем качестве используемых материалов и комплектующих эффективность систем электроснабжения может рассматриваться, и это подтверждает анализ статистических данных, в зависимости от комплексного воздействия многочисленных мультифизических факторов. Широкая область применения и номенклатура конструктивных исполнений, а также целый ряд специфических особенностей элементов систем электроснабжения указывают на необходимость решения задачи оценки и повышения эффективности применительно к конкретному типу оборудования.

Существует общепринятая система классификации технических систем, на основе которой системы электроснабжения принято рассматривать как сложно-структурированные открытые нелинейные системы с избыточным резервированием. На это указывают такие признаки, как многоаспектность, высокий уровень автоматизации, несводимость свойств системы к свойствам элементов, отсутствие однозначной связи между управляющими, возмущающими и управляемыми параметрами и т.д.

Вопросам обеспечения и повышения эффективности СЭ посвящено достаточно большое количество публикаций, но в большинстве из них рассмотрены хотя и важные, но частные задачи. Определение наиболее существенных направлений комплексного развития и повышения эффективности СЭ может быть реализовано двумя путями: установлением аналитических зависимостей, например, процессный подход в виде описания системой дифференциальных уравнений, и моделированием СЭ с использованием современных программно-аппаратных ресурсов. Однако в любом случае необходимо иметь информацию о структуре системы, количественных показателях ее элементов, связях между ними, воздействующих факторах.

Постановка задачи исследования. Общая схема СЭ показана на рис. 1. Основными структурными элементами ее являются источники электрической энергии (объединенная и распределенная генерация) G , оборудование для ее передачи и транспортирования Tn , комплексная нагрузка Zn .

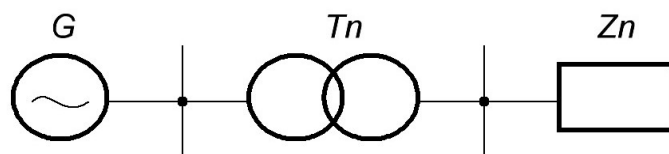


Рис. 1. Общая схема системы электроснабжения

Очевидно, что для синтеза оптимального варианта СЭ необходимы анализ и на его основе обоснование выбора каждого из ее элементов.

Базовым элементом любой СЭ являются источники электрической энергии, которые включают все виды генерирующих установок начиная с системообразующих и заканчивая автономными. При этом именно последние зачастую представляют интерес для разработчиков энергетических объектов, поскольку позволяют на базе, например, ветро- и микрогидрогенераторов (микроГЭС) обеспечивать качественным электроснабжением удаленных от основных энергоресурсов потребителей. Использование автономных источников в распределенных СЭ также позволяет существенно уменьшить зависимость потребителей от централизованного электроснабжения, сни-

жает нагрузку на окружающую среду в процессе строительства и на этапе эксплуатации. Возможность использования альтернативных источников электроэнергии в первую очередь требует учета географических особенностей региона применения. Например, применение микроГЭС предполагает наличие рек, разности высоты на озерных сбросах воды, систем водоочисток, водоподготовки и различных трубопроводов. При наличии требуемой инфраструктуры задача повышения эффективности генерации сводится к выбору типа и конструкции источника, схемы управления и режимов работы СЭ.

Следующим элементом СЭ является комплекс оборудования для преобразования и передачи электроэнергии, в него же входят технические средства измерения, контроля, обработки, хранения информации, реализуемые в виде автоматизированных системы контроля учета электроэнергии (энергоресурсов) – АСКУЭ. В качестве основного объекта исследования здесь следует выделить трансформаторные подстанции и трансформаторы свыше 35 кВ, являющиеся неотъемлемой частью любой СЭ.

Конечным звеном СЭ является комплексная нагрузка, оказывающая существенное влияние на показатели энергосбережения и качества. Применительно к промышленным предприятиям производимая электроэнергия расходуется в основном асинхронным электроприводом (по некоторым данным до 55 %). Поэтому повышение энергоэффективности асинхронной нагрузки теоретически может дать значительный экономический эффект.

Таким образом, задачами анализа направлений развития СЭ являются предварительное рассмотрение ее частных показателей эффективности отдельных элементов, определение наиболее перспективных из них и разработка на этой основе рекомендаций применительно к системе электроснабжения в целом.

Теоретические основы исследования. При проведении анализа элементов СЭ целесообразно выделить для каждого из них наиболее значимые проектные, конструкционные и эксплуатационные факторы. Информационной основой для этого может служить патентный поиск, позволяющий выделить основные с экспертной точки зрения входные, выходные и возмущающие параметры состояния [1-9].

Если рассматривать в качестве источника электроснабжения микроГЭС, то можно обнаружить, что для таких показателей эффективности, как коэффициент полезного действия, технологичность, упрощение конструкции, компактность, в качестве основных варьируемых параметров на первом этапе могут быть рассмотрены размерные соотношения гидротурбины. Это подтверждает анализ направлений исследования микроГЭС, приведенных на рис. 2: 1 – упрощение конструкции, компактность; 2 – повышение надежности; 3 – повышение КПД; 4 – универсальность; 5 – технологичность; 6 – снижение стоимости; 7 – обеспечение инвариантности; 8 – мобильность; 9 – возможность использования при минимальной глубине водоёма; 10 – снижение воздействия на окружающую среду.

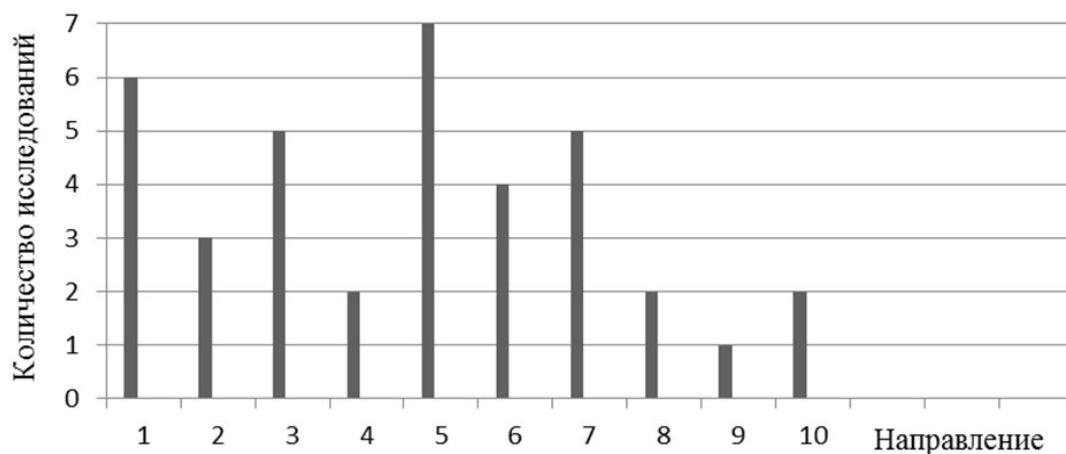


Рис. 2. Направления развития микроГЭС

Теоретической основой для оценки влияния выбранных параметров на выходные характеристики микроГЭС является расчетная методика, предложенная в [10]. Она позволяет связать энергию рабочего потока воды с эффективностью гидротурбин реактивного типа.

Мощность P_T , развиваемая гидротурбиной, определяется из выражения

$$P_T = \gamma \frac{Q \cdot H}{\Omega} \eta_T,$$

где γ – плотность воды; Q – расход воды; H – рабочий напор; Ω – угловая частота вращения; η_T – полный КПД турбины.

Мощность и частота вращения гидротурбины определяют расчетную мощность генератора, его массу, габариты и стоимость. В общем случае эти параметры связаны соотношением

$$\frac{D^2 \cdot l_\delta \cdot \Omega}{P} = \sigma \frac{1}{A \cdot B_\delta},$$

где D – внутренний диаметр статора генератора; l_δ – расчетная длина воздушного зазора; P – полная расчетная мощность генератора; σ – коэффициент пропорциональности; A – линейная нагрузка; B_δ – магнитная индукция в воздушном зазоре.

Уравнение движения системы «гидротурбина – генератор» имеет вид

$$M_{\text{мех}} = M_c + J \frac{d\Omega}{dt},$$

где $M_{\text{мех}}$ – механический момент, развиваемый гидротурбиной; M_c – момент сопротивления генератора; J – момент инерции вращающихся частей; Ω – угловая частота вращения гидроагрегата.

Статическая устойчивость системы и погрешность стабилизации частоты ее вращения определяются суммарным коэффициентом саморегулирования микроГЭС:

$$e_\Sigma = e_r - e_T,$$

где e_r , e_T – соответственно коэффициенты саморегулирования генератора и гидротурбины, зависящие от номинальных (расчетных) значений моментов генератора и гидротурбины в точке номинального режима.

Формально процесс преобразования и передачи электроэнергии не является определяющим для комплексной эффективности СЭ, но от качества работы его элементов зависит работоспособность системы электроснабжения в целом. Поэтому вопросы надежности и безотказности этих элементов являются первоочередными. Это в свою очередь предполагает использование не только современного силового оборудования, но и информационно-коммуникационных средств, реализованных в виде АСКУЭ. Научную базу здесь представляют традиционные и перспективные методы исследования физических процессов, природа их возникновения представлена в [11-13].

Основным объектом исследования являются трансформаторные подстанции и входящие в их состав трансформаторы напряжением свыше 35 кВ. Предмет исследования – управление процессами, определяющими надежность и долговечность изоляционных элементов.

При рассмотрении воздействия на конструкцию изоляции силовых трансформаторов эксплуатационных факторов можно выделить четыре основных вида нагрузок:

1. электрические нагрузки, появляющиеся в результате коммутационных или атмосферных перенапряжений;
2. тепловые нагрузки, непосредственно влияющие на процесс износа изоляции и связанные с термическими перенапряжениями;
3. механические нагрузки, способные вызвать нарушение однородности изоляционного материала при превышении предельных значений;
4. физико-химические воздействия, являющиеся результатом взаимодействия изоляции с охлаждающей средой и элементами конструкции трансформатора.

Для мониторинговых исследований наиболее целесообразно применение метода измерения частичных разрядов, приведенного в ГОСТ 20074-83 «Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов» [14].

Теоретические основы возможности измерения и сравнения значений параметров частичных разрядов с их предельными значениями для диагностики высоковольтного оборудования обоснованы В. П. Вдовико [15].

Общие механизмы протекания физических и химических процессов в газе при частичном разряде и процессы старения изоляции под действием частичных разрядов рассмотрены в работе [16]. В ней показано, что в местах действия частичного разряда происходит разрушение диэлектрического материала, связанное с воздействием быстрых электронов лавины с энергией более 10 эВ.

В работе [17] рассмотрена математическая модель протекания частичного разряда в газе в включении, определяющая зависимость между интенсивностью частичных разрядов и размерами газовых включений в диэлектрике и позволяющая спрогнозировать пробой диэлектрика по спаду интенсивности частичных разрядов. Наличие границы раздела диэлектрических слоев приводит к структурной поляризации, характерной для макроскопических уровней диэлектрической структуры. Время релаксации таких процессов, развивающихся на инфранизких частотах, измеряется десятками и сотнями секунд. Для анализа таких процессов и установления вида функции диэлектрического отклика исследуемой изоляционной системы необходимы исследования поляризационных или деполяризационных токов во времени и применение методов компьютерного моделирования развития частичных разрядов с учетом изменений химического состава диэлектрика. Частичный разряд – электрический разряд, локализованный внутри изоляционной среды, расположенной между двумя электродами.

Теоретической основой исследования является представление частичных разрядов в виде электрических разрядов, находящихся внутри изоляционной системы, расположенной между электродами и представляющей сферу, заполненную газообразным диэлектриком. Процесс поляризации внешним электрическим полем приводит к появлению нескомпенсированных зарядов на границах сферы. Пробой газового диэлектрика и возникновение процесса ударной ионизации и электронной лавины зависят от напряженности электрического поля. Предельное значение напряженности, при котором возникает частичный разряд, можно найти из выражения (закон Пашена)

$$E_B = \frac{44 \cdot 10^6 \cdot H}{\ln(P \cdot d) + 12,8},$$

где H – давление; d – диаметр сферы [15].

На основе рассмотренного теоретического подхода может быть разработана система дистанционного мониторинга и диагностирования систем электроснабжения, обеспечивающая предотвращение аварийных ситуаций в системах электроснабжения [18].

Возможность оценки эффективности комплексной нагрузки является наиболее обеспеченной в научно-методическом плане. Существует целый ряд нормативных документов, регламентирующих показатели качества основных энергопотребителей промышленных предприятий, например, для асинхронных двигателей (АД) основным является ГОСТ Р 51677-2000 [19]. Для проектных и оптимизационных расчетов могут быть использованы расчетные методики, приведенные в фундаментальных пособиях И. П. Копылова, О. Д. Гольдберга, А. В. Иванова-Смоленского и др. Нормативные документы к показателям энергоэффективности относят в первую очередь коэффициент полезного действия и коэффициент мощности. В соответствии с [19] АД подразделяются на две группы: двигатели с нормальным КПД и энергосберегающие двигатели с повышенным КПД, у которых потери мощности при одинаковой мощности и частоте вращения не менее чем на 20 % меньше относительно первой группы. Коэффициент мощности тех и других АД ограничивается снизу одинаковыми значениями. Минимальный допустимый КПД энергосберегающего двигателя рекомендуется определять по формуле

$$\eta_3 = \frac{\eta}{100 - e(100 - \eta)} \cdot 100,$$

где η – КПД нормальных двигателей, %; $e = 0,2$ – снижение суммарных потерь, о.е.

Однако принятая в этом стандарте оценка энергоэффективности только по КПД является односторонней, недооценивает влияние коэффициента мощности на показатели эффективности системы электроснабжения. Известно, что генерация и передача реактивной мощности приводят к потерям активной мощности. Потенциальные источники реактивной мощности (трансформаторы, коммутационные и защитные аппараты, линии электропередач) при проектировании СЭ выбираются по полной расчетной мощности, обратно пропорциональной произведению КПД и коэффициента мощности отдельных электроприемников, влияющих на стоимость передачи и распределения электроэнергии. В то же время оценка энергоэффективности по этим параметрам неоднозначно учитывает расход первичной энергии (топлива) на генерацию реактивной энергии, который в большей степени определяется потерями активной мощности, связанными с генерацией и передачей реактивной. Более точно показатели энергоэффективности оцениваются «стоимостным» коэффициентом полезного использования энергии:

$$\eta_c = \frac{\eta}{1 + k_c \cdot \operatorname{tg} \varphi}; \quad k_c = \Pi_p \Pi_a; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos \varphi}}{\cos \varphi},$$

где k_c – относительная стоимость реактивной энергии; Π_a – цена активной электроэнергии; Π_p – цена реактивной электроэнергии; $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент реактивной мощности.

Практический расчет «стоимостного» коэффициента затруднен неопределенностью цены реактивной электроэнергии. Энергоснабжающие организации обычно устанавливают специальные режимы потребления реактивной мощности.

Более простой является оценка эффективности по приведенному КПД, учитывающему как потери активной электроэнергии в нагрузке, так и дополнительные потери в электрических сетях, вызванные потреблением реактивной мощности этой нагрузкой:

$$\eta_c = \frac{\eta}{1 + k_3 \cdot \operatorname{tg} \varphi},$$

где k_3 – коэффициент увеличения потерь активной мощности, учитывающий потери на генерацию и передачу реактивной мощности.

С учетом фактической загрузки точнее оценивать эффективность АД по формуле

$$\eta_H = \frac{\eta_\varepsilon}{1 + k_3 \cdot (\operatorname{tg} \varphi_\varepsilon - \operatorname{tg} \varphi_0)},$$

где $\operatorname{tg} \varphi_\varepsilon = \operatorname{tg}(\arccos \varphi_\varepsilon)$; η_ε и $\cos \varphi_\varepsilon$ – соответственно КПД и коэффициент мощности при среднем значении коэффициента загрузки; $\operatorname{tg} \varphi_0 = \operatorname{tg}(\arccos \varphi_0)$; $\cos \varphi_0$ – коэффициент мощности, при котором потребитель материально нейтрален.

Выводы. Выполненный анализ основных направлений развития и совершенствования систем электроснабжения показывает, что повышение эффективности генерации, передачи и использования электроэнергии связано с частными показателями элементов системы. Основой исследования качества основных процессов, характеризующих эффективность систем электроснабжения, является наличие теоретической базы, обеспечивающей возможность выбора, обоснования и использования распределенных источников электроэнергии, средств мониторинга и диагностирования информационных потоков в объектах энергетики, оптимизация потребления электроэнергии на стороне потребителя.



ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. №1462019 А1 СССР, МПК⁷F 03 В 13/00. Гидроэнергетический агрегат / Б. А. Ботбаев, В. А. Витовский, В. Р. Шеленберг; заявитель и патентообладатель Киргизский научно-исследовательский отдел энергетики. – № 4192895/25-06; заявл. 09.02.87; опубл. 28.02.89. Бюл. № 8.
2. Пат. № 1664962А1 СССР, МПК⁷Е 02В9/06. Напорный водовод малой ГЭС / Н. А. Ходанков, В. В. Афанасьев, А. Ж. Боданов, К. П. Аширалиев; заявитель и патентообладатель Джамбулский гидромелиоративно-строительный институт. – № 4655646/15; заявл. 27.02.89; опубл. 23.07.91. Бюл. № 27.
3. Пат. № 1803598 А1 СССР, МПК⁷F 03 В 17/06. Бесплотинная ГЭС / С. Р. Расулов, А. Ф. Ширинский; заявитель и патентообладатель Таджикский научно-исследовательский отдел энергетики. – № 4767690/29; заявл. 11.12.89; опубл. 23.03. 93. Бюл. № 11.
4. Пат. № 2380478С1 Российская Федерация, МПК⁷Е02В7/02. Мобильная плотина парашютного типа / В. М. Палецких, А. А. Усман; заявитель и патентообладатель В. М. Палецких, А. А. Усман. – № 2008124532/03; заявл. 16.06.08; опубл. 27.01.10. Бюл. № 3.
5. Пат. № 9157411 В2 США, Электрическая энергогенерирующая система / Д. Л. Криппс; заявитель и патентообладатель Д. Л. Криппс. – №14/311566; заявл. 23.06.14; опубл. 13.10.15.
6. Пат. № 1642055 А1 СССР, МПК⁷ F 03 В 13/00. Приливная ГЭС / В. Г. Соколов, И. В. Соколова. – № 4679884/29; заявл. 18.04.89; опубл. 15.04.91. Бюл. № 14.
7. Пат. № 2418131 С1 Российская Федерация, МПК⁷ Е 02 В 7/02, Е 02 В 9/00. Мобильное гидроэнергетическое сооружение наполняемого типа / Д. В. Кашкарин, П. А. Годин, М. А. Годин; заявитель и патентообладатель Д. В. Кашкарин. – № 2009140849/21; заявл. 03.11.09; опубл. 10.05.11. Бюл. № 13.
8. Пат. № 29051 А4 Республика Казахстан, МПК⁷ F 03 В 13/00, F 03 С 4/00. Мобильная ГЭС / Б. С. Ахметов, Л. Ш. Балгабаева, О. В. Киселева, П. Т. Харитонов; заявитель и патентообладатель Республиканское гос. пред. на праве хоз. ведения «Казахский национальный тех. унив. им. К. И. Сатпаева» Мин. обр. и науки Республики Казахстан. – № 2013/1459.1; заявл. 30.10.13; опубл. 15.10.14. Бюл. № 10.
9. Пат. № 29180 А4 Республика Казахстан, МПК⁷ Н 02 К 29/00. Мобильная Микро-ГЭС / Б. С. Ахметов, П. Т. Харитонов; заявитель и патентообладатель Б. С. Ахметов, П. Т. Харитонов. – № 2013/0323.1; заявл. 15.03.13; опубл. 17.11.14. Бюл. № 11.
10. Лукутин, Б. В. Возобновляемые источники электроэнергии: учеб. пособие / Б. В. Лукутин. – Томск: ФГАОУ ВО «НИ ТПУ», 2008. – 187 с.
11. Зенова, Е. В. Разработка и исследование методов диагностики изоляционной системы маслонаполненных трансформаторов на основе изучения спектров токов поляризации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.02 / Зенова Елена Валентиновна. – МЭИ, 2013. – 40 с.
12. Чернышев, В. А. Определение состояния и остаточного ресурса силового электроэнергетического оборудования / В. А. Чернышев, Е. В. Зенова, В. Р. Григорян // Электричество. – 2011. – № 1. – С. 32-35.
13. Чичев, С. И. Диагностика силовых трансформаторов 110 кВ и выше в региональных сетевых компаниях / С. И. Чичев, Е. И. Глинкин // Электроэнергетика. – 2010. – № 3. – С. 6-12.
14. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. – Введ. 1984-07-01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1984. – 22 с.
15. Вдовико, В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В. П. Вдовико. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
16. Brunt, R. J. van Physics and chemistry of partial discharge and corona. Recent advances and future challenges / R. J. van Brunt // IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul. – 1994. – Vol. 1, № 5. – P. 761-784.
17. Исмагилов, Ф. Р. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика / Ф. Р. Исмагилов, Д. В. Максудов. – Вестник УГАТУ. – № 3. – С. 98-100.
18. Иванов, С. Н. Эффективность надежности электроэнергетических систем / С. Н. Иванов, А. А. Скрипилев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № III-1(27). – С. 20-26.
19. ГОСТ Р 51677-2000. Машины электрические асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Показатели энергоэффективности. – Введ. 2001-07-01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2001. – 4 с.

Дерюжкова Н. Е., Купова А. В., Соловьев В. А.
N. E. Deryuzhkova, A. V. Kupova, V. A. Solovyev

НЕЧЕТКИЙ ЛОГИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР СТАТИЧЕСКОГО КОМПЕНСАТОРА

FUZZY LOGIC CONTROLLER OF STATIC COMPENSATOR

Дерюжкова Нелли Егоровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Mrs. Nelli E. Deryuzhkova – Doctor of Engineering, Head of Electric drive and industrial plant automation Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Купова Анастасия Викторовна – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: avkupova@etu.ru.

Mrs. Anastasia V. Kupova – Senior Lecturer, Theoretical Bases of Electrical Engineering Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» (Russia, Saint Petersburg). E-mail: avkupova@etu.ru.

Соловьев Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Mr. Vyacheslav A. Solovyev – Doctor of Engineering, Head of Electric Drive and Industrial Plant Automation Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассматривается вопрос интеллектуализации управления системы источник питания – дуговая сталеплавильная печь – статический компенсатор мощности путем применения нечетких законов управления. Для получения желаемого режима работы системы, удовлетворяющего требуемым показателям качества как со стороны технологического процесса, так и со стороны источника питания, предложено использовать двухступенчатый нечеткий регулятор, что позволяет поддерживать требуемый уровень напряжения в сети и пофазно компенсировать реактивную нагрузку.

Summary. In the article, the problem of control intellectualization of the power supply system is considered – arc steelmaking furnace – static power compensator by applying fuzzy control laws. To satisfy the desired operating mode of the system that meets the required quality indicators, both on the technological process side and on the power supply side, it is suggested to use a two-stage non-precise regulator, which allows maintaining the required voltage level in the network and phase compensating of the reactive load.

Ключевые слова: нечеткий логический регулятор, статический компенсатор реактивной мощности, регулирование напряжения.

Key words: fuzzy logic controller, static VAR compensator, voltage control.

УДК 004.896

В последнее время системы управления на основе нечеткой логики получают все большее распространение. По сравнению с классическими законами управления нечеткие позволяют получить ряд преимуществ, в числе которых более высокое быстродействие и точность регулирования системы управления, особенно в тех случаях, когда объект регулирования плохо идентифицируем.

Примером такой системы является система энергопитания дуговой печи, имитационная модель которой, разработанная в программном комплексе MatLab, показана на рис. 1. В рассматриваемой системе дуговая печь мощностью 120 МВт через два понижающих трансформатора подключена к сети питания напряжением 220 кВ. В процессе работы дуговая печь из-за специфики протекания технологического процесса существенно ухудшает показатели качества электроэнер-

гии питающей линии, к которой подключены и другие потребители. Поэтому для устранения негативного влияния в систему энергоснабжения дуговой печи включается статический тиристорный компенсатор (СТК), состоящий из тиристорно-реакторной группы (TCR) и фильтрокомпенсирующих цепей (TSC). Реактивная составляющая мощности компенсируется путем ступенчатого включения TSC и плавного подрегулирования с помощью TCR. Модель СТК в рассматриваемом примере разработана на основе [3] с учетом особенностей системы.

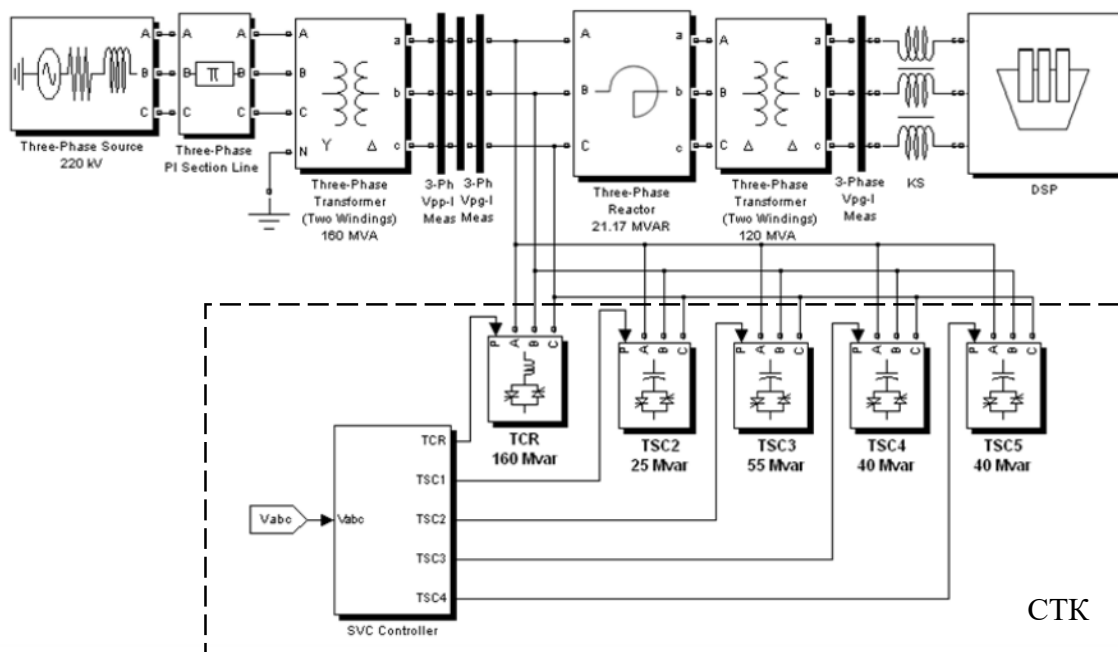


Рис. 1. Имитационная модель системы энергоснабжения ДСП

Традиционно управление СТК в системе источник питания – ДСП – СТК осуществляется по пропорционально-интегральному закону регулирования, однако в рассматриваемой системе параметры ДСП в ходе технологического процесса могут изменяться скачкообразно и в широком диапазоне, что вызывает необходимость резкой коррекции коэффициентов регулятора, что не всегда реализуемо. Поэтому в качестве альтернативы рассмотрим использование регулятора на нечеткой логике (НЛР).

Так как в первую очередь ставится задача поддержания необходимого уровня напряжения в сети, то в качестве входных переменных используются сигнал отклонения напряжения e от заданного значения и скорость изменения de/dt этого отклонения (см. рис. 2). Выходной переменной является проводимость B нагрузки, которая должна быть получена с помощью СТК. Чтобы избежать лишней колебательности в системе, сигнал B проходит через фильтр низких частот.

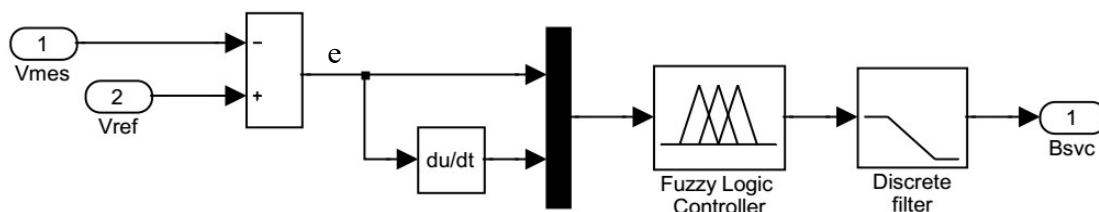


Рис. 2. Схема включения нечеткого регулятора

Диапазоны, в которых происходят изменения входных лингвистических переменных, были получены в результате исследований по имитационной модели системы [1]. Для каждой лингвистической переменной выбрано по пять функций принадлежности. Для переменной отклонения e предполагалось равномерное распределение функций принадлежности по всему диапазону, но в

результате экспериментальных исследований на модели были получены функции, приведенные на рис. 3, а. Таким образом, функция NM включает в себя перерегулирование, Z – нахождение сигнала около заданного значения, PM – малое отклонение, PS – среднее отклонение и PB – большое отклонение от заданного значения напряжения. Распределение функций принадлежности переменной скорости изменения уровня напряжения приведено на рис. 3, б. Диапазон изменения выходной переменной B от 0 до 1, распределение функций принадлежности в нем соответствует включению фильтров TSC, кроме переменной Z, где фильтры выключены (см. рис. 3, в).

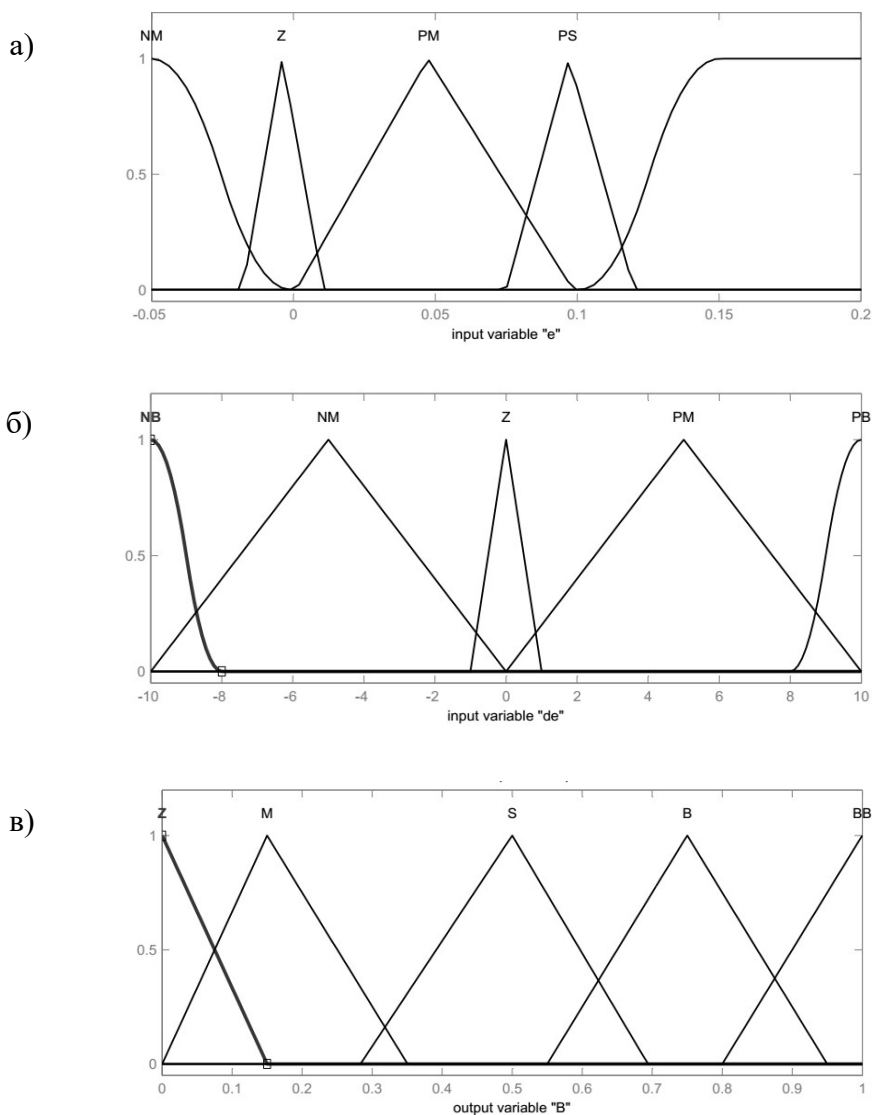


Рис. 3. Функции принадлежности выходных лингвистических переменных:
 а – «Отклонение напряжения от заданного уровня e »; б – «Скорость изменения отклонения напряжения de/dt »; в – «Проводимость СТК В»

База знаний нечеткого логического регулятора:

- 1 ЕСЛИ « e » есть NM, ТО « B » есть Z;
- 2 ЕСЛИ « e » есть Z И (« de/dt » есть NB ИЛИ « de/dt » есть NM ИЛИ « de/dt » есть Z), ТО « B » есть M;
- 3 ЕСЛИ « e » есть Z И (« de/dt » есть PM ИЛИ « de/dt » есть PB), ТО « B » есть S;
- 4 ЕСЛИ « e » есть PM И (« de/dt » есть NB ИЛИ « de/dt » есть NM), ТО « B » есть M;
- 5 ЕСЛИ « e » есть PM И (« de/dt » есть Z ИЛИ « de/dt » есть PM), ТО « B » есть S;
- 6 ЕСЛИ « e » есть PM И « de/dt » есть PB, ТО « B » есть B;

7 ЕСЛИ «е» есть PS И («de/dt» есть NB ИЛИ «de/dt» есть NM ИЛИ «de/dt» есть Z ИЛИ «de/dt» есть PM), ТО «В» есть В;

8 ЕСЛИ «е» есть PV И («de/dt» есть PV, ТО «В» есть ВВ;

9 ЕСЛИ «е» есть PV, ТО «В» есть ВВ.

На рис. 4 – 5 приведены графики переходных процессов при различных типах регуляторов. По этим графикам видно, что в системе с НЛР переходные процессы заканчиваются в момент времени 0,2 с, тогда как в системе с ПИ-регулятором – 0,25 с. Несмотря на небольшой выигрыш в быстродействии системы регулирования можно говорить, что НЛР является лучшим решением, т.к. кроме этого позволяет добиться лучшей стабилизации напряжения сети и эффективней компенсировать реактивную мощность. Как видно из приведенных диаграмм, ПИ-регулятор при малых нагрузках еще позволяет добиться приемлемого коэффициента мощности, при больших нагрузках его значение ниже допустимого предела ($\cos\varphi = 0,8$). Кроме того, в системе с ПИ-регулятором не удастся добиться выхода коэффициента мощности на конечное значение, наблюдается некоторая колебательность сигнала.

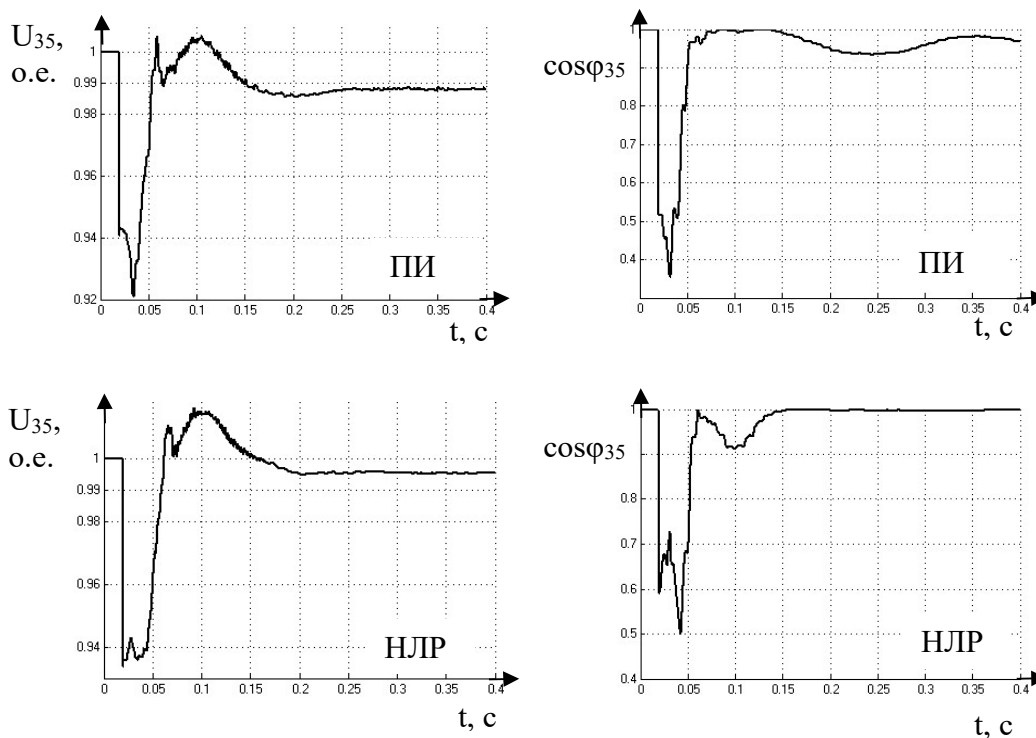


Рис. 4. Графики переходных процессов напряжения и коэффициента мощности при малой нагрузке

Необходимо отметить, что использование нечеткого принципа управления уменьшает значение высших гармоник в сети питающего напряжения. Для подтверждения этого на рис. 6 приведены осциллограммы питающего напряжения сети при использовании традиционного ПИ-закона управления (см. рис. 6, а) и нечеткого управления (см. рис. 6, б).

Полученные результаты справедливы для системы, работающей с симметричной нагрузкой. В реальной системе энергоснабжения несмотря на то, что в точке включения дуговой печи осуществляется симметрирование по фазам за счет управления печными электродами, в сети наблюдается некоторая несимметрия. По результатам моделирования несимметричного режима работы (см. рис. 7) видно, что НЛР, который предназначен для поддержания нужного уровня напряжения, не справляется с поддержанием достаточного уровня коэффициента мощности при несимметрии.

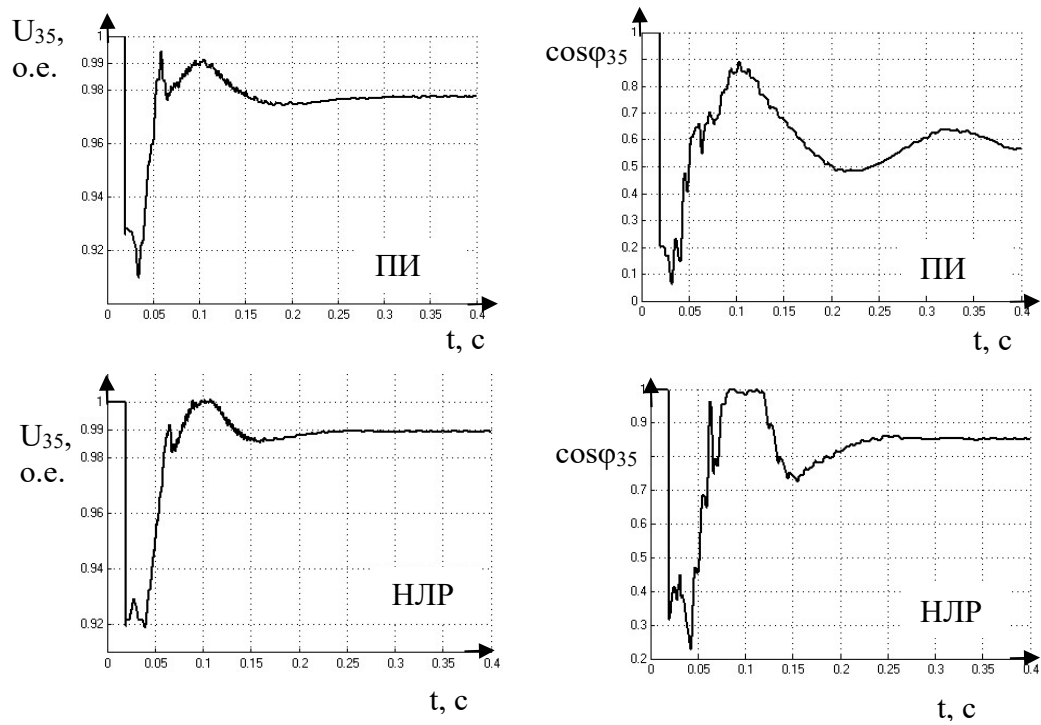


Рис. 5. Графики переходных процессов напряжения и коэффициента мощности при большой нагрузке

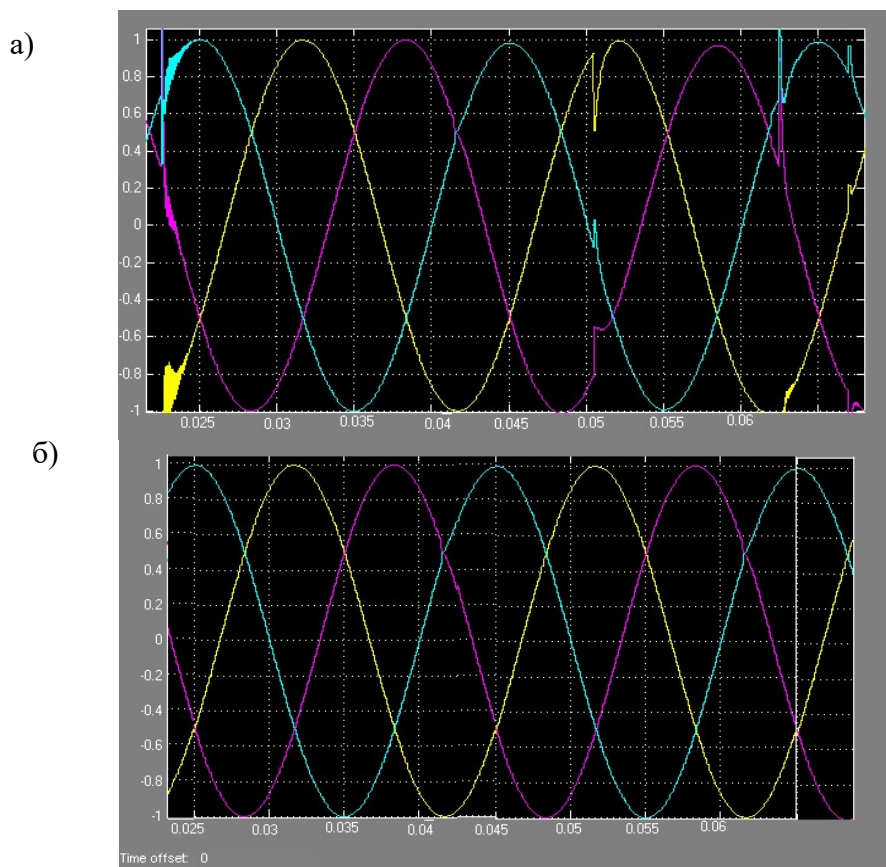


Рис. 6. Осциллограммы питающего напряжения при ПИ-законе управления СТК (а) и при нечетком законе управления СТК (б)

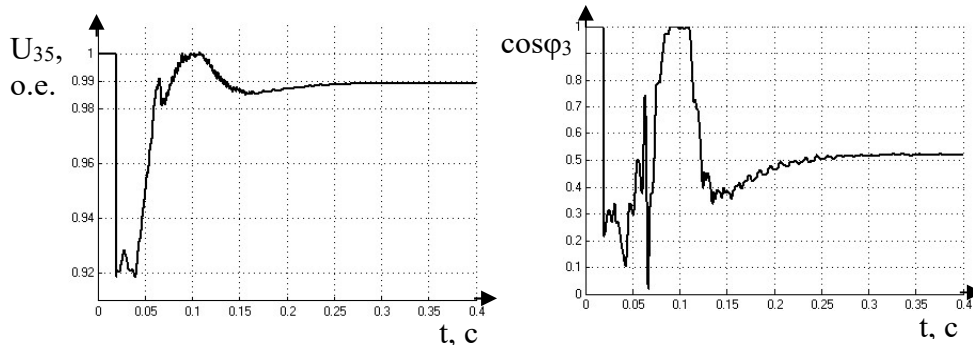


Рис. 7. Графики переходных процессов напряжения и коэффициента мощности при несимметрии нагрузки

На основании вышеизложенного можно прийти к выводу о необходимости использования дополнительного регулятора, позволяющего осуществлять пофазную компенсацию. Входными лингвистическими переменными для этого регулятора являются коэффициенты мощности по каждой фазе ($\cos\phi_A, \cos\phi_B, \cos\phi_C$) и выходная переменная первого регулятора (V). Так как необходимо пофазное регулирование, то выходными переменными второго НЛР являются фазные проводимости, которые должны быть получены с помощью включения TSC и TCR ($B_{svcA}, B_{svcB}, B_{svcC}$). Схема включения двух нечетких регуляторов приведена на рис. 8.

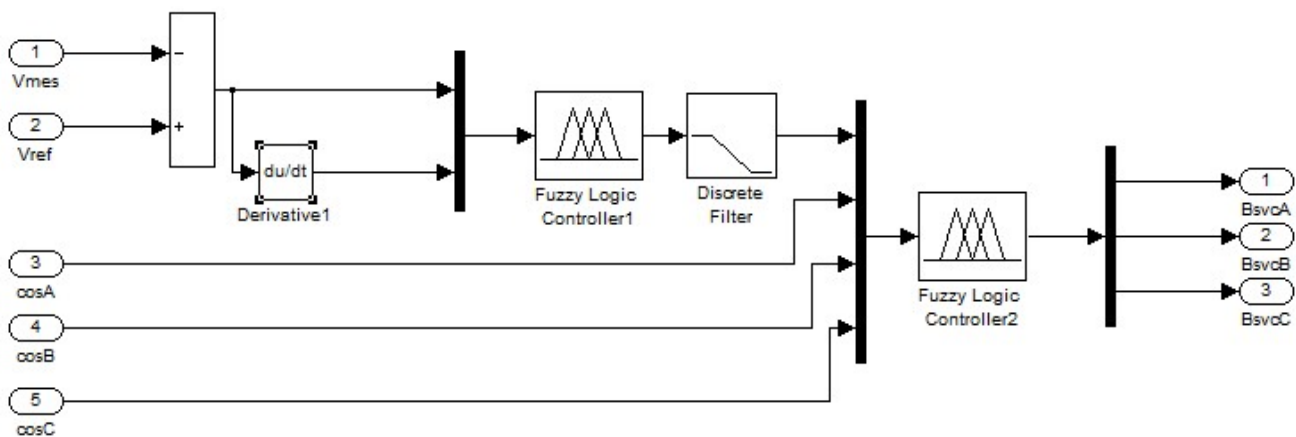


Рис. 8. Схема включения двухступенчатого НЛР

Распределение функций принадлежности входной переменной V и выходных переменных $B_{svcA}, B_{svcB}, B_{svcC}$ совпадает с распределением, показанным на рис. 3, в. На рис. 9 приведены функции принадлежности входной лингвистической переменной коэффициент мощности по одной фазе $\cos\phi_A$. По остальным фазам распределение функций принадлежности аналогично.

Изменение переменной $\cos\phi_A$ происходит в диапазоне от 0 до 1. В этом диапазоне распределены три функции принадлежности: N – коэффициент мощности в допустимых пределах, коррекция проводимости не требуется; S – коэффициент мощности ниже допустимого значения, требуется коррекция проводимости; M – коэффициент мощности очень низкий, требуется включение большой проводимости.

База знаний второго нечеткого логического регулятора:

- 1 ЕСЛИ « V » есть VV , ТО « B_{svcA} » есть VV ;
- 2 ЕСЛИ « V » есть Z , ТО « B_{svcA} » есть Z ;
- 3 ЕСЛИ « V » есть M И (« $\cos\phi_A$ » есть M ИЛИ « $\cos\phi_A$ » есть S), ТО « B_{svcA} » есть S ;
- 4 ЕСЛИ « V » есть M И « $\cos\phi_A$ » есть N , ТО « B_{svcA} » есть M ;
- 5 ЕСЛИ « V » есть S И « $\cos\phi_A$ » есть M , ТО « B_{svcA} » есть VV ;

- 6 ЕСЛИ «В» есть S И « $\cos\varphi_A$ » есть S, ТО « B_{svcA} » есть B;
 7 ЕСЛИ «В» есть S И « $\cos\varphi_A$ » есть N, ТО « B_{svcA} » есть S;
 8 ЕСЛИ «В» есть B И (« $\cos\varphi_A$ » есть M ИЛИ « $\cos\varphi_A$ » есть S), ТО « B_{svcA} » есть BB;
 9 ЕСЛИ «В» есть B И « $\cos\varphi_A$ » есть N, ТО « B_{svcA} » есть B.

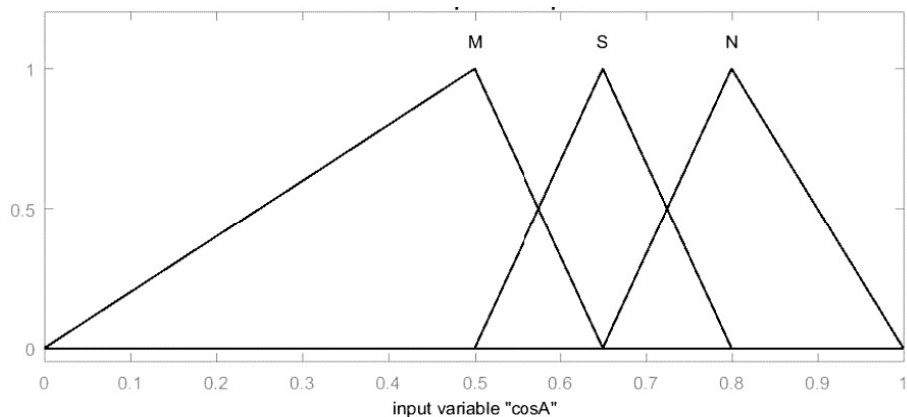


Рис. 9. Функции принадлежности входной лингвистической переменной «коэффициент мощности фазы $\cos\varphi_A$ »

На рис. 10 приведен результат моделирования предлагаемой двухкаскадной системы, из которого следует, что использование двухступенчатого НЛР эффективно при малых и больших нагрузках при несимметричном режиме. При сравнении диаграмм на рис. 10, а и рис. 6, полученных при одинаковой нагрузке, видно, что дополнительный нечеткий регулятор в системе позволяет повысить коэффициент мощности до требуемого уровня.

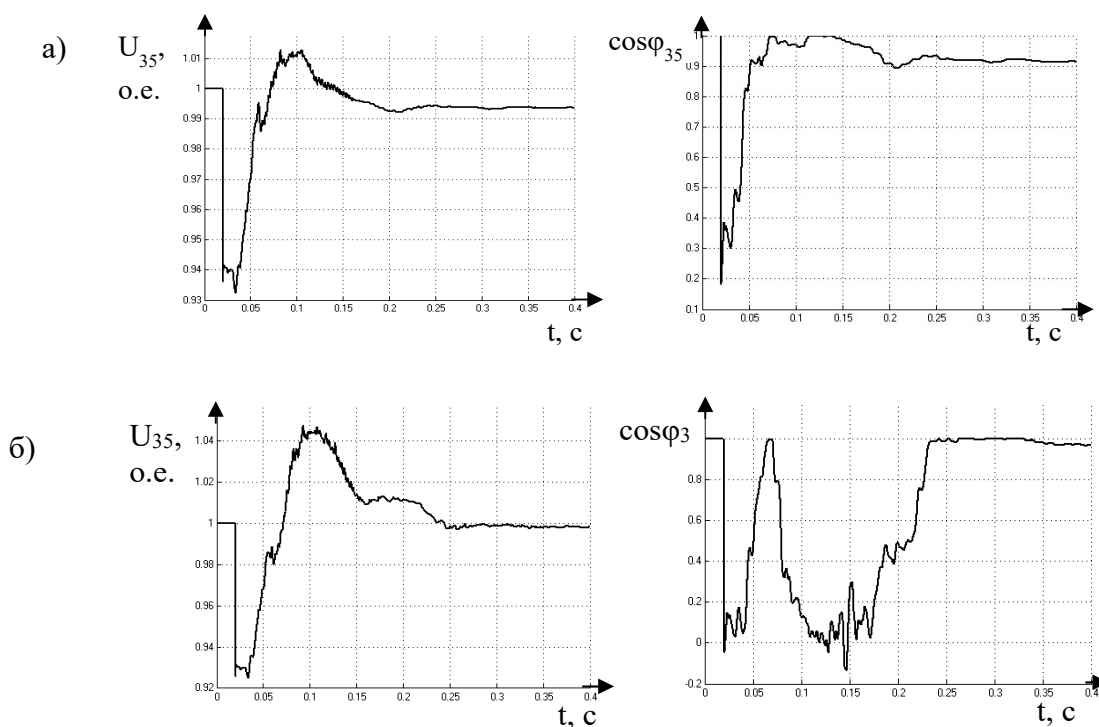


Рис. 10. Графики переходных процессов напряжения и коэффициента мощности при несимметрии с малой нагрузкой (а) и с большой нагрузкой (б) в системе с двумя НЛР

Здесь не приводятся результаты пофазного управления с использованием ПИ-регулятора, т.к. они соответствуют результатам, полученным при симметричной нагрузке. О положительной



работе ПИ-регулятора можно говорить только при малых мощностях. При больших мощностях, которые в реальной системе используются достаточно продолжительное время, регулятор не справляется с компенсацией реактивной составляющей нагрузки, тогда как использование двухступенчатого нечеткого регулятора позволяет добиться хороших результатов. В то же время наличие перерегулирования по напряжению во время переходного процесса и соответствующее этому перерегулированию «проседание» коэффициента мощности предполагают возможность для дальнейшей оптимизации регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев, В. А. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 23-28.
2. Pierre Giroux, Gibert Sybille. SVC (Detailed Model) [Электронный ресурс] // Mathworks USA, 1994-2017. – Режим доступа: http://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps_product-power_svc_1tcr3tsc-svc-detailed-model (дата обращения: 18.08.2017).
3. Hingorani, Narain G. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems / Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. – New York: IEEE PRESS, WILEY INTERSCIENCE, 2000. – 428 p.

Амосов О. С., Магола Д. С., Баена С. Г.

СЕТЕВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ АТАК В ЗАДАЧАХ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ФРАКТАЛЬНОГО И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

Амосов О. С., Магола Д. С., Баена С. Г.

O. S. Amosov, D. S. Magola, S. G. Baena

СЕТЕВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ АТАК В ЗАДАЧАХ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ФРАКТАЛЬНОГО И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

NETWORK CLASSIFICATION OF INFORMATION SECURITY ATTACKS BASED ON INTELLIGENTS TECHNOLOGIES, FRACTAL AND WAVELET ANALYSIS

Амосов Олег Семенович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: osa18@yandex.ru.

Mr. Oleg S. Amosov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Industrial Electronics Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: osa18@yandex.ru.

Магола Дмитрий Степанович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: dmagola@list.ru.

Mr. Dmitry S. Magola – PhD in Engineering, Associate Professor, Informational Systems Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: dmagola@list.ru.

Баена Светлана Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: svetlana.baena@yandex.ru.

Ms. Svetlana G. Baena – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: svetlana.baena@yandex.ru.

Аннотация. Представлена сетевая классификация атак в рамках задач информационной безопасности. В основе алгоритма используются интеллектуальные технологии, фрактальный и вейвлет-анализы. Сформулирована постановка задачи сетевой классификации атак, описаны этапы решения, представлен иллюстрирующий пример.

Summary. Network classification of the attacks within problems of information security is presented. As the basis of this algorithm the intelligent technologies, fractal and wavelet-analyses are used. Problem definition of network classification of the attacks is formulated, decision stages are described, and the illustrating example is presented.

Ключевые слова: информационная безопасность, классификация, нечеткий вывод, нейронная сеть, фрактальный анализ, вейвлет-анализ.

Key words: information security, classification, fuzzy output, neural network, fractal analysis, wavelet analysis.

УДК 004.056.5

Введение

Обеспечение эффективности задач любого предприятия напрямую связано с их информационной составляющей. Структура любой информационной системы (ИС), независимо от предметной области, включает в себя функциональные подсистемы, выполняющие возложенные на ИС задачи. При этом эффективная работа ИС возможна только при условии отсутствия аномальных активностей, не предусмотренных сценариями поведения и функционирования системы. Ошибки ИС, имеющие антропогенный или техногенный характер, могут не только на определенное время вывести систему из функционального состояния, но и исказить/ уничтожить/ несанкционированно скопировать конфиденциальную информацию, нанеся предприятию (или даже определенному фи-

зическому лицу, если речь идет о персональных данных) значительный, а подчас и непоправимый, экономический, репутационный и/или социальный ущерб.

Недопущение описанного выше ущерба является задачей информационной безопасности ИС, т.е. обеспечения требуемого уровня защищенности информации, хранимой и обрабатываемой в ИС, от негативного воздействия на нее с точки зрения нарушения ее целостности или несанкционированного использования.

С учетом многогранности задач информационной безопасности (ИБ) данное направление оснащено соответствующим математическим обеспечением:

- формальные модели безопасности компьютерных систем с дискреционным, мандатным, ролевым управлением доступом;
- криптографические модели и методы, решающие задачи шифрования, обеспечения целостности и удостоверения авторства информации;
- методы распределения и хранения ключевой и парольной информации;
- методы защиты от разрушающих программных воздействий;
- методы сетевой безопасности, реализуемые в межсетевых экранях и системах обнаружения вторжений;
- и другие.

Отличительной особенностью является то, что данная предметная область характеризуется большой степенью неопределенности, случайности, нестабильности, влиянием разнообразных возмущений во времени, вследствие чего построение и использование точных моделей на основе классического математического аппарата зачастую является неэффективным. Вследствие этого все больше работ отечественных и зарубежных авторов для решения разнообразных задач ИБ используют различные сочетания моделей и методов искусственного интеллекта: экспертные системы, искусственные нейронные сети, нечеткую логику, генетические алгоритмы, роевой интеллект, а также гибридные подходы с другими математическими направлениями [4-8; 10; 12; 13; 18-22].

Так, к примеру, в [12] проведен эволюционный криптоанализ криптосистем с открытым ключом на основе задачи о рюкзаке и блочной криптосистемы DES в режиме электронной кодовой книги. Показана и экспериментально исследована применимость семейства эволюционных и генетических алгоритмов в некоторых вариантах криптоанализа. Разработаны алгоритмы работы нейронечеткой системы оценки.

В работе [13] разработана методология проектирования перспективных систем ИБ для корпоративных информационных сетей на основе интеллектуальных методов нечетких систем, нейронных сетей и генетических алгоритмов. Построена обобщенная модель адаптивной системы ИБ с элементами эволюционных процессов и самоорганизации. Выполнена алгоритмическая интерпретация моделей адаптивной защиты, основанной на принципе биологического подобия с элементами эволюционных процессов и самоорганизации.

В диссертационной работе [6] предложен новый подход к построению систем обнаружения вторжений на базе нейронных сетей, заключающийся в использовании иерархии модулей с обратными связями. Каждый модуль содержит определенный тип нейронной сети. Разработаны архитектура, методики обучения и тестирования систем обнаружения вторжений.

В [8] изложено применение различных методов теории нечетких множеств для решения теоретических и практических задач в области оценки защищенности и анализа риска потери информационных ресурсов компьютерных систем, идентификации атак на информационно-коммуникационные системы, автоматизации процессов осуществления экспертиз в системе технической защиты информации, построения быстродействующих аппаратных средств и различных систем защиты специального назначения.

В [18] рассмотрен алгоритм работы системы управления ИБ на основе мягких вычислений и реализован прототип системы обнаружения вторжений (IDS) для программно-конфигурируемых сетей в составе сбора статистики и модулей обработки и принятия решений. Оценка системы была проведена на одной из основных проблем сетевой безопасности – идентификации хостов. Пред-

ложенный алгоритм в сочетании с принятием решений на основе нечетких правил показал лучшие результаты, чем алгоритмы безопасности, которые используются отдельно.

В [20] рассматриваются алгоритмы определения модели выбора оптимальной стратегии ИБ распределенной системы с учетом эквивалентности средств защиты. Анализируются муравьиные алгоритмы и генетические алгоритмы с различными законами распределения вероятностей хромосомных мутаций. В частности, рассматривается нормальное, равномерное, экспоненциальное распределение и распределение Пуассона. Кроме того, рассматривается генетический алгоритм Уитли и генетический алгоритм Эшельмана.

В работах [4; 5] используются фрактальный и вейвлет-анализ для обработки сетевого трафика, в том числе для решения задач ИБ.

Однако несмотря на значительное число работ в области ИБ решение ее задач по-прежнему остается актуальным и требует разработки новых алгоритмов в различных ее областях.

Решение задач ИБ не может быть сведено формально к какому-либо одному классу задач. Так, в частности, при решении практической задачи сетевой безопасности необходимо в первую очередь определить наличие либо отсутствия атаки, т.е. решить задачу классификации, и в случае необходимости перенастроить параметры системы защиты с целью минимизации ущерба, а это возможно в случае приведения состояния системы защиты к «оптимальной» модели, для чего требуется решить задачу идентификации.

Задачи сетевой безопасности сводятся к рассмотрению задач защиты телекоммуникационного трафика и анализа временных рядов. Здесь широко используются традиционные методы статистического анализа случайных величин и функций. Наряду с ними в последние годы получают распространение способы обработки сигналов, основанные на фрактальном и вейвлет-преобразованиях [1; 2; 4; 5; 14; 15]. Особенностью первых является выявление самоподобности, что позволяет отнести временной ряд к заранее определенной модели. Отличительная особенность последних состоит в том, что они позволяют вскрыть особенности локальной структуры и выявить различные свойства сложного сигнала, невидимые при обычном представлении в режиме реального времени. Также хорошо зарекомендовали себя интеллектуальные системы, основанные на гибридном использовании аппаратов искусственных нейронных сетей и нечеткой логики [2; 9; 17], а для подстройки параметров подобных структур зачастую используются роевые методы, такие как генетические и муравьиные алгоритмы [18-22].

Таким образом, при построении эффективной системы сетевой защиты перспективными являются следующие подходы:

- использование фрактального и вейвлет-анализа;
- использование интеллектуальных систем.

Постановка задачи сетевой классификации

Так как для решения задачи защиты телекоммуникационного трафика ИС проводится его анализ с целью определения наличия или отсутствия сетевых атак, то задача сводится к задаче классификации с целью отнесения рассматриваемого временного ряда к одному из двух классов {«отсутствие атаки», «присутствие атаки»}. Однако решение задачи в данной постановке, т.е. определение факта наличия или отсутствия атаки, в рамках задач ИБ является малопродуктивным, поскольку данное решение не позволяет определить степень влияния атаки на информационный ресурс (уровень риска) и вес распределения ресурсов системы защиты информации на локализацию конкретной атаки на конкретный информационный ресурс в масштабах защиты всей ИС. Поэтому существует риск не оптимального распределения ресурсов системы, т.е. решения задач защиты информации без учета ценности применения такого решения для всего комплекса ИС.

В первую очередь рассмотрим классическую постановку задачи бинарной классификации [2; 3].

Дано множество X , в котором хранится описание объектов o . Y – конечное множество классов. Классификатором F является отображение X в множество Y , т.е. $F: X \rightarrow Y$. Признак f объекта o – это отображение $f: o \rightarrow \mathbf{D}_f$, где \mathbf{D}_f – множество допустимых значений признака f . Если задан

набор признаков f_1, \dots, f_m для некоторого объекта o , то вектор признаков x объекта $o \in X$ может быть определен как $x = (f_1(o), \dots, f_m(o))$.

Классификатор F должен быть способен классифицировать произвольный объект $o \in X$. Приведенная постановка задачи иллюстрируется рис. 1.

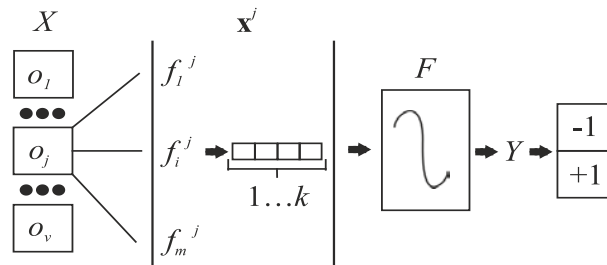


Рис. 1. Постановка задачи бинарной классификации

Оптимальным считается классификатор, который дает наименьшую вероятность ошибки $P(x)$ при всех допустимых значениях x . Тогда критерием оптимальности будет $P(x) \rightarrow \min_{x \in X}$. Следует отметить, что ошибки разделяются на «ошибки 1-го рода» (ложное срабатывание) и «ошибки 2-го рода» (пропуск события).

Для обучения классификатора F используется обучающая выборка, заданная множеством $D = \{(x_1, y_1), \dots, (x_v, y_v)\}$, $y_r \in Y = \{-1; +1\}$, $r = \overline{1, v}$.

В случае рассмотрения сетевого трафика обучающее множество должно включать в себя следующие параметры:

- статистические: интенсивность байтов в единицу времени, интенсивность пакетов в единицу времени, средний размер пакетов и др.;
- параметры канала передачи: пропускную способность, частоту потерь, задержку канала, загрузку;
- фрактальные: показатель самоподобности, фрактальную размерность, корреляционный параметр, спектральный показатель, фрактальный показатель.

Интерпретируем задачу классификации для решения задачи ИБ, в частности задачи сетевой безопасности (см. рис. 2).

Дано множество X , в котором хранится описание объектов o . Каждый объект o представляет собой конечный физический информационный ресурс, который подвержен сетевым взаимодействиям. Набор признаков f_1, \dots, f_m характеризует информационный ресурс o , т.е. вектор признаков x объекта $o \in X$ может быть определен как $x = (f_1(o), \dots, f_m(o))$. Y – конечное множество классов риска. Другими словами, Y – это рейтинг требуемого уровня защищенности информационного ресурса $Y \in [-1; +1]$ в момент определения атаки, при этом рейтинг равный «-1» говорит об отсутствии необходимости выделения дополнительных ресурсов на защиту информационного ресурса, а рейтинг равный «+1» – о 100%-й необходимости выделения ресурсов системы защиты. В зависимости от требования к уровню защищенности и ценности хранимой и обрабатываемой информации каждому объекту o присвоен соответствующий вес информационного ресурса w . На основе весов и рейтингов информационных ресурсов система защиты распределяет свои мощности C для защиты информационных ресурсов в масштабе всей ИС.

Для обучения классификатора F используется обучающая выборка, заданная множеством $D = \{(x_1, y_1), \dots, (x_v, y_v)\}$, $y_r \in Y = \{-1; +1\}$, $r = \overline{1, v}$.

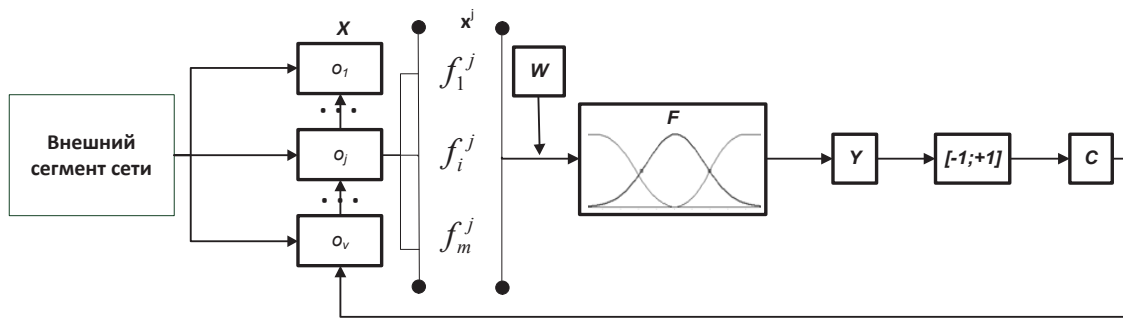


Рис. 2. Постановка задачи сетевой безопасности

Другими словами, для присвоения объекту o_j рейтинга $y_r \in Y = \{-1; +1\}$, $r = \overline{1, v}$ модель M^i признаков объекта должна быть идентифицирована с эталонной моделью M_{Σ}^i , которая в свою очередь в связи с динамическими изменениями параметров сегмента компьютерной сети в режиме реального времени должна адаптироваться с прогнозной моделью M_{Π}^i в соответствии с заданным критерием $J^* \rightarrow J$ (см. рис. 3).

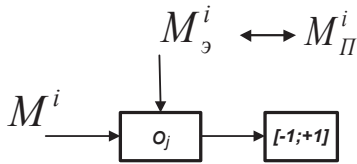


Рис. 3. Классификация объекта

Решение задачи сетевой классификации

Задачу сетевой классификации необходимо решать в комплексе задач интеллектуальной подсистемы ИБ, представленной на рис. 4.

Алгоритм решения представлен на рис. 5. Вес информационного ресурса может быть интерпретирован как класс ИС, и на основе требований законодательства РФ в области защиты информации составлена соответствующая матрица весов. На основе знаний экспертов в области ИБ возможно составить продукционную базу знаний и с использованием нечетких систем классифицировать информационные риски, а с использованием методов роевого интеллекта решать задачу оптимального распределения ресурсов системы защиты информации для локализации атак информационных ресурсов с максимальной ценностью для всего комплекса защищаемой ИС.

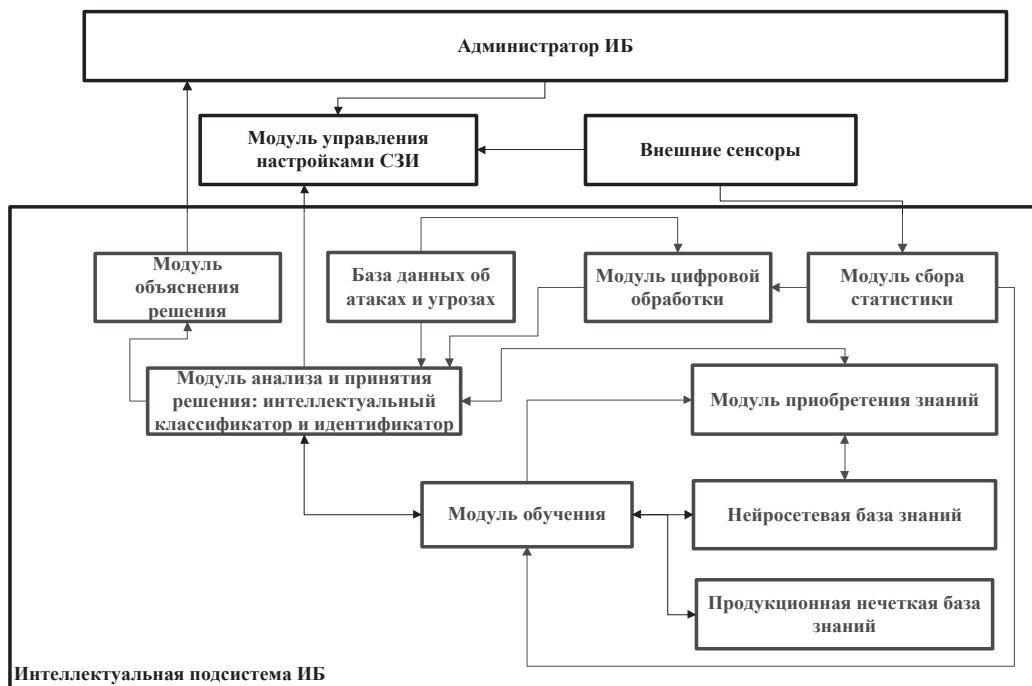


Рис. 4. Интеллектуальная подсистема ИБ

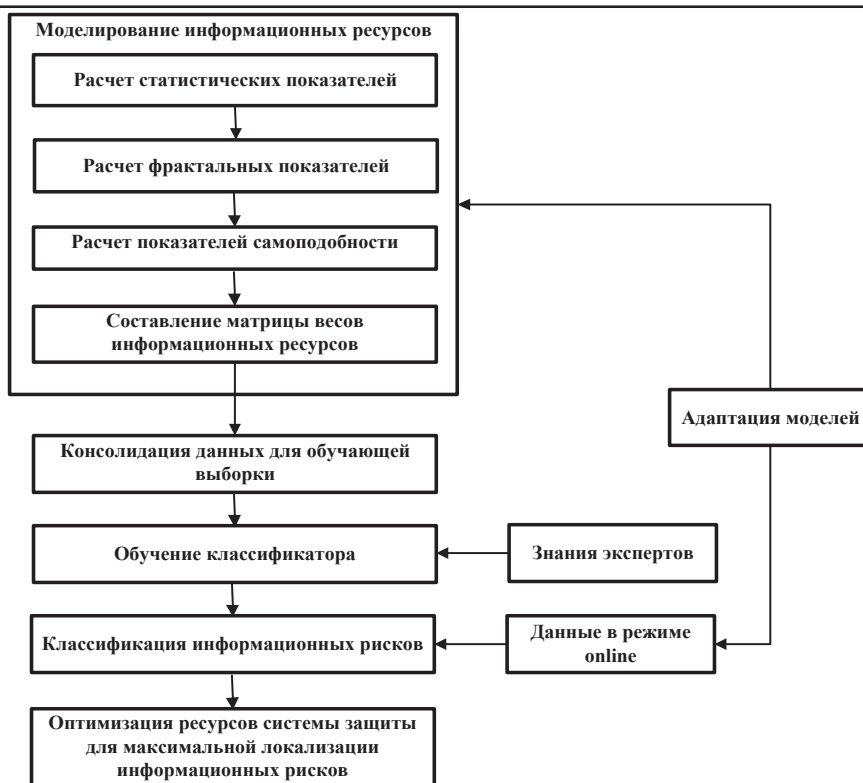


Рис. 5. Алгоритм решения задачи

Как известно, при использовании интеллектуальных систем выделяют два основных режима: режим обучения и штатный режим работы (online-режим). По аналогии для интеллектуального сетевого классификатора выделим два режима.

В первом режиме на основе экспертных знаний с использованием обучающего множества отыскивается зависимость выходов от входов. Другими словами, в данном режиме составляется адекватная и непротиворечивая база знаний, включающая в себя в том числе фрактальные показатели в качестве одного из входов.

Во втором режиме (online-режим) на основе составленной модели при получении входного вектора оценивается рейтинг информационного ресурса в конкретный момент времени.

Таким образом, решение задачи разбивается на ряд подзадач:

1. В режиме синтеза составить модель сетевого трафика на основе статистических и фрактальных показателей, а также с учетом матрицы весов.
2. В штатном режиме осуществить предобработку временного ряда с целью вычисления параметров трафика и подачи их на вход обученному модулю.
3. Применить администратором ИБ в специальной интеллектуальной подсистеме соответствующие противоборствующие меры.

В свою очередь решение 1-й подзадачи сводится к выполнению следующих этапов:

1. Расчет статистических параметров трафика.
2. Расчет показателя самоподобности на основе R/S-метода и/или вейвлет-преобразований.
3. Создание матрицы весов на основе уровня значимости информации и масштабов информационного ресурса.
4. Составление обучающей выборки.
5. Создание модели информационного ресурса на основе обучающей выборки и продукционной базы знаний экспертов ИБ.
6. Адаптация параметров обучения при взаимодействии со средой.

Ниже представлены описание первых 3 этапов и иллюстрирующий пример, описывающий 4-й и 5-й этапы.

Этап 1. Расчет статистических параметров трафика связан с процессом измерения сетевого трафика. Измерение сети является основой исследования поведения сети, которое включает активное и пассивное измерения. Активное измерение осуществляется путем ввода стандартных тестовых пакетов (например, ping, traceroute и др.), но данное измерение обладает главным недостатком: генерация большого количества тестовых пакетов может нарушить нормальное функционирование сети и, как следствие, составленная на этом типе измерения модель сети не будет являться адекватной. При пассивном измерении анализируются данные, собранные с нескольких узлов. Недостатком такого измерения является необходимость сбора и обработки большого объема данных.

Этап 2. Расчет показателя самоподобности основывается на фрактальном анализе. Фракталями в математическом смысле называют множества, обладающие свойствами самоподобности, т.е. единообразия структуры в широком диапазоне масштабов [15]. Во фрактальном анализе показатели хаотичности – показатели самоподобности, показатель Херста H и фрактальной размерности D – отражают степень хаотичности временного ряда [1; 4], где

$$D = 2 - H.$$

Значение H позволяет искать решение в одном из четырех классов:

1. детерминированный временной ряд, аппроксимирующийся линейной или нелинейной монотонной функцией при $H \approx 1$;
2. персистентный ряд, аппроксимирующийся авторегрессионными моделями при $0,5 < H < 1$;
3. антиперсистентный ряд, аппроксимирующийся качественными моделями при $0 < H < 0,5$;
4. стохастический временной ряд, аппроксимирующийся марковскими моделями при $H \approx 0,5$.

Оценка H зависит от многих факторов и сама по себе является сложной задачей, поскольку при работе в реальных условиях исследователь всегда ограничен конечными наборами данных, что приводит к невозможности однозначного утверждения о наличии или отсутствии самоподобности всей трассы ряда.

Наиболее часто на сегодняшний день для оценки показателя Херста используются анализ нормированного размаха (R/S-метод) [4], анализ графика изменения дисперсии [15] и вейвлет-анализ [4; 14].

Нормированная безразмерная мера, способная описывать изменчивость временного ряда, названа нормированным размахом (R/S). Для заданного набора наблюдений X со средним

$\bar{X} = (\sum_{j=1}^n X_j) / n$, где n – количество наблюдений, вводится понятие размаха (разности между мак-

симальным и минимальным отклонением) $R(n) = \max \Delta_j - \min \Delta_j$, где

$1 \leq j \leq n, \Delta_k = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}), \forall k = \overline{1, n}$ $S(n) = \frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n}$. Известно, что для многих природных яв-

лений математическое ожидание нормированного размаха примерно равно cn^H при $n \rightarrow \infty$, где c – положительная константа, не зависящая от n .

Тогда показатель H можно получить, изобразив график зависимости $\log(M(R(n)/S(n)))$ от $\log(n)$, и, используя полученные точки, подобрать по методу наименьших квадратов прямую линию с наклоном H [4].

С целью определения количественного значения H Херст привел эмпирический закон в виде [4; 15]

$$H = \text{Ln}\left(\frac{R}{S}\right) / \text{Ln}\left(\frac{n}{2}\right).$$

Также показатель Херста может быть оценен с помощью вейвлет-анализа, который позволяет идентифицировать временной ряд при наличии у него локальных особенностей и неоднородностей [1].

На практике показатель Херста оценивается с помощью дискретного вейвлет-преобразования. Для этого в режиме реального времени вычисляются детализирующие коэффициенты $d_{j,k}$ для каждого уровня разложения j , $j = \overline{1, m}$ и каждой позиции k , $k = \overline{1, n_j}$, где n_j – число вейвлет-коэффициентов на уровне разложения j . Далее выполняется оценка дисперсии для каждого

уровня j : $\hat{\varepsilon}_j = (1/n_j) \cdot \sum_{k=1}^{n_j} d^2(j, k)$, строится зависимость $\log_2(\hat{\varepsilon}_j)$ от уровня j , вычисляется наклон

α линии регрессии и вычисляется $H = \frac{\alpha + 1}{2}$ [4; 15].

В работе [4] авторы используют фрактальный и вейвлет-анализ для обработки сетевого трафика, в том числе для решения задач ИБ.

Этап 3. Для создания матрицы весов на основе уровня значимости информации и масштабов информационного ресурса предлагается использовать аналогию требований законодательства РФ по вопросам классификации ИС, обрабатывающих информацию, не составляющую государственную тайну [11]. Значение веса $w = \{0.25, 0.5, 0.75, 1\}$ будет аналогично соответствующим классам, т.е. вес равный 1 аналогичен самому высокому классу К1, а вес равный 0.25 – классу К4.

Уровень значимости информации определяет степень возможного ущерба от нарушения конфиденциальности, целостности или доступности информации. Данную степень владелец информации определяет самостоятельно, и она может быть:

- высокой, если в результате нарушения одного из свойств безопасности информационный ресурс не может выполнять возложенные на него задачи;
- средней, если в результате нарушения одного из свойств безопасности информационный ресурс не может выполнять хотя бы одну возложенную на него задачу;
- низкой, если в результате нарушения одного из свойств безопасности информационный ресурс может выполнять возложенные на него задачи с недостаточной эффективностью.

Выделяют 4 уровня значимости информации:

- У31, если хотя бы для одного из свойств безопасности информации (конфиденциальности, целостности, доступности) определена высокая степень ущерба;
- У32, если хотя бы для одного из свойств безопасности информации (конфиденциальности, целостности, доступности) определена средняя степень ущерба и нет ни одного свойства, для которого определена высокая степень ущерба;
- У33, если для всех свойств безопасности информации (конфиденциальности, целостности, доступности) определены низкие степени ущерба;
- У34, если степень ущерба от нарушения свойств безопасности информации (конфиденциальности, целостности, доступности) не может быть определена, но при этом информация подлежит защите.

В табл. 1 указана матрица весов.

Таблица 1

Матрица весов

| Уровень значимости | Масштаб | | |
|--------------------|------------|------------|-----------|
| | глобальный | сегментный | локальный |
| У31 | 1 | 1 | 1 |
| У32 | 1 | 0.75 | 0.75 |
| У33 | 0.75 | 0.5 | 0.5 |
| У34 | 0.5 | 0.5 | 0.25 |

Иллюстрирующий пример

Для иллюстрации 4-го и 5-го этапов была составлена обучающая выборка, включающая в себя следующие входные данные: интенсивность байтов в единицу времени ($In1$); интенсивность пакетов в единицу времени ($In2$); размер пакета (P); показатель самоподобности (H); вес информационного ресурса (W). Выходом является рейтинг (R), который может принимать значения в диапазоне $[-1; +1]$.

Упрощенная продукционная база знаний на основе знаний экспертов представлена ниже, а для логического вывода используется нечеткий преобразователь на основе модели Сугено:

1. Если $In1$ малая И $In2$ малая И P малый И $H < 0.5$ И W соответствует $K4$, ТО $R = -1$;
2. Если $In1$ средняя И $In2$ средняя И P средний И $H < 0.5$ И W соответствует $K3$, ТО $R = 0$;
3. Если $In1$ большая И P средний И $H > 0.5$ И W соответствует $K2$, ТО $R = +0.5$;
4. Если $In1$ большая И P средний И $H > 0.5$ И W соответствует $K2$, ТО $R = +1$;
5. Если $In1$ большая И $In2$ большая И P большой И $H = 0.5$ И W соответствует $K1$, ТО $R = +1$;
6. Если $In1$ большая И $In2$ большая И P большой И $H = 0.5$ И W соответствует $K2$, ТО $R = +0.5$;
7. Если $In1$ большая И $In2$ большая И P большой И $H < 0.5$ И W соответствует $K2$, ТО $R = 0$;
8. Если $In1$ средняя И $In2$ средняя И P большой И $H > 0.5$ И W соответствует $K3$, ТО $R = 0$;
9. Если $In1$ средняя И $In2$ средняя И P малый И $H = 0.5$ И W соответствует $K2$, ТО $R = +0.5$;
10. Если $In1$ малая И $In2$ малая И P малый И W соответствует $K1$, ТО $R = +1$;
11. Если $In1$ средняя И $In2$ средняя И P большой И $H = 0.5$ И W соответствует $K3$, ТО $R = -0.5$;

Ниже представлено описание входных лингвистических переменных:

$$In1 = \langle \text{«Интенсивность байтов»}, \{ \text{«Малая» } \mu_{\text{малая}}(In1) = e^{-\frac{(In1)^2}{2 \cdot 17^2}}, \text{«средние»} \\ \mu_{\text{средние}}(In1) = e^{-\frac{(In1-50)^2}{2 \cdot 17^2}}, \text{«большие» } \mu_{\text{большие}}(In1) = e^{-\frac{(In1-100)^2}{2 \cdot 17^2}} \}, [0, 100] \rangle;$$

$$In2 = \langle \text{«Интенсивность пакетов»}, \{ \text{«Малая» } \mu_{\text{малая}}(In2) = e^{-\frac{(In2)^2}{2 \cdot 17^2}}, \text{«средние»} \\ \mu_{\text{средние}}(In2) = e^{-\frac{(In2-50)^2}{2 \cdot 17^2}}, \text{«большие» } \mu_{\text{большие}}(In2) = e^{-\frac{(In2-100)^2}{2 \cdot 17^2}} \}, [0, 100] \rangle;$$

$$P = \langle \text{«Размер пакета»}, \{ \text{«Малый» } \mu_{\text{малый}}(P) = e^{-\frac{(P)^2}{2 \cdot 348^2}}, \text{«средний»} \\ \mu_{\text{средний}}(P) = e^{-\frac{(P-1024)^2}{2 \cdot 348^2}}, \text{«большой» } \mu_{\text{большой}}(P) = e^{-\frac{(P-2048)^2}{2 \cdot 348^2}} \}, [0, 2048] \rangle;$$

$$H = \langle \text{«Показатель Херста»}, \{ \text{«}H < 0.5\text{» } \mu_{H < 0.5}(H) = 0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{H - 0.2765}{0.685 - 0.2765} \pi\right), \text{«}H = 0.5\text{»} \\ \mu_{H = 0.5}(H) = e^{-\frac{(x-0.5)^2}{2 \cdot 0.037^2}}, \text{«}H > 0.5\text{» } \mu_{H > 0.5}(H) = 0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{H - 0.685}{0.685 - 0.36} \pi\right) \}, [0, 1] \rangle;$$

$$W = \langle \text{«Вес информационного ресурса»}, \{ \text{«}K4\text{» } \mu_{K4}(W) = 0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{W - 0.25}{0.5 - 0.25} \pi\right), \text{«}K3\text{»} \\ \mu_{K3}(W) = e^{-\frac{(W-0.5)^2}{2 \cdot 0.1^2}}, \text{«}K2\text{» } \mu_{K2}(W) = e^{-\frac{(W-0.75)^2}{2 \cdot 0.1^2}}, \text{«}K1\text{» } \mu_{K1}(W) = 0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{H - 1}{1 - 0.75} \pi\right) \}, [0, 1] \rangle.$$

Моделировалась ситуация, при которой в компьютерной сети имеются два хоста: ПК1 – атакующий, ПК2 – атакуемый (см. рис. 6). Среди средств защиты ПК2 имеется АВПО «Kaspersky Endpoint Security 10», средство защиты информации от несанкционированного доступа «Secret

Net», а также нечеткий классификатор, реализованный в среде MATLAB. Со стороны ПК1 имитировалась DDOS-атака [16] с помощью приложения LOIC.

На вход нечеткого классификатора поступили следующие данные:

- интенсивность байтов – 48,7 %;
- интенсивность пакетов – 100 %;
- размер пакета – 1380 Кб;
- показатель Херста – 0,928;
- вес информационного ресурса – 1.

Рейтинг, рассчитанный нечетким классификатором, составил 0.98 (см. рис. 7), что говорит о необходимости защиты информационного ресурса и направления системой защиты своих ресурсов исходя из распределения на остальные хосты информационной системы (в конкретном примере 100 % ресурсов системы защиты должны быть направлены на ПК2).



Рис. 6. Имитация атаки

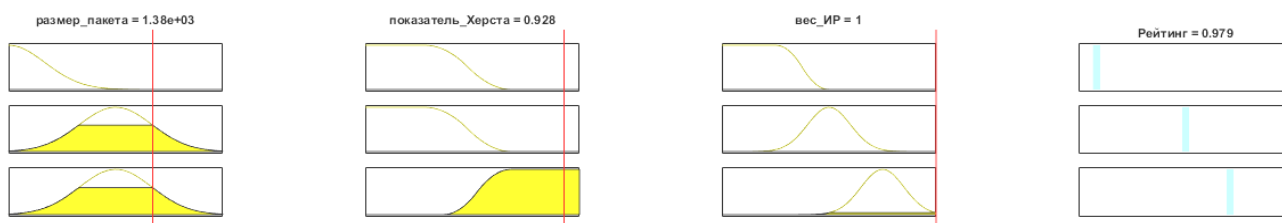


Рис. 7. Вывод нечеткого классификатора

Заключение

В работе представлена постановка задачи сетевой классификации в рамках задач ИБ, предложен алгоритм решения задачи на основе интеллектуальных систем, фрактального и вейвлет-анализа, описаны этапы решения, представлен иллюстрирующий пример. Необходимо отметить, что описанный выше подход ориентируется на обучение с учителем, поскольку знания экспертов позволят сформировать полную, адекватную и непротиворечивую систему отображений входов в предполагаемые рейтинги. Однако данный подход, возможно, имеет недостаток, в частности, невозможность идентификации моделей, для которых не предусмотрены обучающие примеры. Как один из выходов авторы видят возможность использования обучения без учителя и использования в качестве метода нечеткой кластеризации, поскольку при обучении выход основывается на подобии между классифицируемыми объектами и учитывается сложность представления вероятностного критерия, на основе которого осуществляется присвоение определенного рейтинга информационного ресурса (или, другими словами, определения вероятности наличия или отсутствия атак на информационный ресурс).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания проектной части № 2.1898.2017/ПЧ «Создание математического и алгоритмического обеспечения интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы безопасности вуза».

ЛИТЕРАТУРА

1. Амосов, О. С. Вейвлет-алгоритмы оценивания нестационарных процессов с фрактальной структурой, имеющих неоднородности и нарушения / О. С. Амосов, С. Г. Баена // Информатика и системы управления. – 2017. – № 2 (52). – С. 85-99.
2. Амосов, О. С. Локализация человека в кадре видеопотока с использованием алгоритма на основе растущего нейронного газа и нечеткого вывода / О. С. Амосов, Ю. С. Иванов, С. В. Жиганов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41. – № 1. – С. 46-58.

3. Амосов, О. С. Модифицированный алгоритм детекции лиц в видеопотоке и его программная реализация / О. С. Амосов, Ю. С. Иванов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – № 3 (22). – С. 92.
4. Амосов, О. С. Фрактальный и вейвлет-анализ телекоммуникационных рядов информационной системы / О. С. Амосов, Д. С. Магола, Н. В. Муллер // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1 (25). – С. 28-36.
5. Басараб, М. А. Обнаружение аномалий в информационных процессах на основе мультифрактального анализа / М. А. Басараб, И. С. Строганов // Вопросы кибербезопасности. – 2014. – № 4 (7). – С. 30-40.
6. Жульков, Е. В. Построение модульных нейронных сетей для обнаружения классов сетевых атак: дис. ... канд. техн. наук / Жульков Е.В. – СПб., 2007.
7. Использование нейронных сетей для защиты информации / сост. И. В. Солодовников, В. И. Солодовников, В. И. Анисимов. – Отчет Инвент. Номер: 02200954561. – Центр информационных технологий в проектировании РАН, 2009.
8. Корченко, А. Г. Построение систем защиты информации на нечетких множествах. Теория и практические решения / А. Г. Корченко. – Киев: «МК-Пресс», 2006. – 320 с.
9. Круглов, В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
10. Нейросетевые модели для систем информационной безопасности: учеб. пособие / Ю. А. Брюхомицкий. – Таганрог: Изд-во ТРГУ, 2005. – 160 с.
11. Требования о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах: приказ ФСТЭК РФ от 11 февраля 2013 г. № 17; Об утверждении Составы и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных: приказ ФСТЭК РФ от 18 февраля 2013 г. № 21.
12. Разработка нейро-нечетких и генетических алгоритмов для решения задач криптоанализа и оценки экономической эффективности сбыта продукции предприятия / сост. Д. К. Бабенко, Ю. А. Брюхомицкий, Р. Н. Кононенко. – Отчет Инвент. Номер 02990005640. – Таганрогский государственный технический университет, 1999.
13. Разработка и исследование адаптивной системы информационной безопасности для корпоративных информационных сетей / сост. Ф. Г. Нестерук, Л. Г. Осовецкий, А. А. Костин, С. И. Воскресенский, Т. Н. Баранюк, Д. В. Звонов, У. А. Молдовян, И. М. Инюшин, В. О. Доскач, Р. В. Леонтьев. – Отчет Инвент. Номер 02200951251. – ГОУВПО «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики», 2009.
14. Смоленцев, Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлет в MATLAB / Н. К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с.
15. Шелухин, О. И. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / О. И. Шелухин, А. В. Осин, С. М. Смольский. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
16. Уланов, В. А. Защита от DDoS-атак: механизмы предупреждения, обнаружения, отслеживания источника и противодействия / В. А. Уланов, И. В. Котенко // Защита информации. – 2007. – № 2. – С. 70-77.
17. Яхьяева, Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети / Г. Э. Яхьяева. – М.: Бином, 2006.
18. Dotcenko, S., Vladyko, A., Letenko, I. A fuzzy logic-based information security management for software-defined networks, 16th International Conference on Advanced Communication Technology, Pyeongchang, 2014. – P. 167-171.
19. Hamamoto, A. H., Carvalho, L. F., Proenca, M. L. ACO and GA metaheuristics for anomaly detection, 2015 34th International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC), Santiago, 2015. – P. 1-6.
20. Katsupeev, A. A., Shcherbakova, E. A., Vorobyev, S. P. Comparison of evolutionary algorithms used to solve the optimization problem of information security of distributed systems, 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, 2016. – P. 1-3.
21. Otero, A. R., Tejay, G., Daniel Otero, L. and Ruiz-Torres, A. J. A fuzzy logic-based information security control assessment for organizations, 2012 IEEE Conference on Open Systems, Kuala Lumpur, 2012. – P. 1-6.
22. Wu, M. S. Genetic algorithm using discrete cosine transformation for fractal image encode, 2012 International Conference on Information Security and Intelligent Control, Yunlin, 2012. – P. 309-312.

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА
MATHEMATICS AND MECHANICS

Шитиков А. В., Шитиков С. А.

A. V. Shitikov, S. A. Shitikov

МОДЕЛЬ УПРУГОПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ

THE MODEL OF ELASTIC PLASTICITY IN CYCLIC DEFORMATION OF MATERIALS

Шитиков Александр Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физико-математических дисциплин Российского государственного профессионально-педагогического университета (Россия, Екатеринбург). E-mail: a.shitikov2011@yandex.ru.

Mr. Alexandre V. Shitikov – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Physics and Mathematical Disciplines Department, Russian State Vocational Pedagogical University (Russia, Yekaterinburg). E-mail: a.shitikov2011@yandex.ru.

Шитиков Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики Уральского государственного экономического университета (Россия, Екатеринбург). E-mail: shitikov-s-a@yandex.ru.

Mr. Sergey A. Shitikov – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Mathematics, Ural State University of Economics (Russia, Yekaterinburg). E-mail: shitikov-s-a@yandex.ru.

Аннотация. Численно решена задача циклического растяжения-сжатия для построенной ранее авторами модели упрочняющегося упругопластического тела. Эта модель основана на введении вариационного принципа максимума диссипации механической энергии. В ней не совпадают понятия пластических и остаточных деформаций, показана возможность наблюдения «зуба текучести», показана возможность уменьшения мгновенного модуля сдвига при ортогональной догрузке. В данной работе исследованы особенности кривых напряжения-деформации для различных материалов при пропорциональном циклическом деформировании как для циклически упрочняющихся, так и для циклически разупрочняющихся тел. Установлены пределы изменения материальных констант, при которых эти кривые имеют качественные особенности.

Summary. The task of cyclic tension-compression for the model of a hardening elastoplastic body constructed earlier by the authors has been solved numerically. This model is based on the introduction of the variation principle of the maximum of the mechanical energy dissipation. The concepts of plastic and residual deformations are not equal in this model. The possibility of observing the "yield drop" is shown, the possibility of reducing the instant shear modulus under orthogonal loading is shown. In this paper, we investigate the features of strain-stress curves for various materials under proportional cyclic deformation, both for cyclically hardening and cyclically softening bodies. The limits of the change in material constants for which these curves have qualitative features are established.

Ключевые слова: упругость, пластичность, упрочнение, циклическое деформирование, диссипация, определяющие уравнения.

Key words: elasticity, plasticity, hardening, cyclic deformation, dissipation, determining equations.

УДК 539.3

Актуальность задачи циклического деформирования упругопластических материалов, некоторые результаты и методы её решения изложены, к примеру, в публикациях [1; 3; 8].

Данная работа посвящена применению ранее предложенной авторами модели упругопластического упрочняющегося тела к задаче циклического деформирования. Эта модель основана на применении вариационного принципа максимума диссипации механической энергии, который впервые был предложен в [5] для замыкания системы уравнений упругопластичности при конечных деформациях [4; 7]. Это позволило избежать определения скорости пластической деформации (различные определения приводят к существенно различным соотношениям пластичности). В [6] принцип максимума диссипации механической энергии применён к случаю малых деформаций и

получен ряд интересных результатов. В частности, показано, что в одной области значений материальных констант тангенс угла наклона касательной к графику кривой напряжения-деформации μ_σ должен быть положительным при активном нагружении, что обычно следует из не имеющего термодинамического обоснования постулата устойчивости Друкера [2], в другой же области материальных констант возможны значения $\mu_\sigma < 0$, т.е. наблюдается «зуб текучести».

При численном решении задачи циклического деформирования, как и в работе [6], рассматривается случай малых деформаций, когда справедливо разложение полных деформаций $\varepsilon_{ij} = 0,5(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$ в виде суммы упругих e и пластических p : $\varepsilon = e + p$. Здесь $u(x, t) = x(t) - x_0$, t – время, x , x_0 – вектора текущего и начального положения материальной точки в декартовой системе координат. Для тензора p постулируется $\dot{p}(x, t) = 0$ при разгрузке. Точка сверху означает материальную производную по времени. Под разгрузкой подразумевается, что для рассматриваемого материального элемента выполняется $\varphi < 0$, где $\varphi = 0$ – уравнение поверхности нагружения. В качестве параметров состояния среды принимаются тензоры e , p , энтропия на единицу массы S и тензор внутренних переменных κ , с помощью которого описывается часть мощности диссипации механической энергии, условно названная энергией, идущей на перестройку «внутренней структуры» элемента. Для этого тензора также постулируется $\dot{\kappa} = 0$ при разгрузке. В качестве математического выражения II начала термодинамики часто принимается неравенство Планка:

$$P = T\dot{S} + \rho^{-1} I \cdot \partial q / \partial x \geq 0, \quad (1)$$

где T – абсолютная температура; ρ – плотность; q – вектор потока тепла; I – единичный тензор; $A \cdot B = A_{ij} B_{ji}$. В рассматриваемой модели, наряду с неравенством (1), требуется выполнение условия неотрицательности мощности диссипации механической энергии:

$$D = P + F_\kappa \cdot \dot{\kappa} \geq 0, \quad F(e, p, \kappa, T) = U(e, p, \kappa, S) - TS,$$

где F и U – свободная и внутренняя энергии на единицу массы, $(\dots)_A = \partial(\dots) / \partial A_{ij}$. Слагаемое $F_\kappa \cdot \dot{\kappa} = U_\kappa \cdot \dot{\kappa}$ – часть диссипации, идущая на перестройку «внутренней структуры» элемента [5]. Из закона сохранения энергии $\rho \dot{U} = \sigma \cdot \dot{\varepsilon} - I \cdot \partial q / \partial x$ и требования $D = P = 0$ при разгрузке, следует связь напряжений σ с параметрами состояния: $\sigma = \rho F_e$. Считая эту связь справедливой и при активном нагружении, имеем $D = (F_e - F_p) \cdot \dot{p}$ [6]. Для случая пластически несжимаемой среды $p = \bar{p}$, $\kappa = \bar{\kappa}$, где $\bar{A} = A - A \cdot I / 3$. Разложение свободной энергии и связь $\sigma = \sigma(\bar{e}, \kappa, T)$ записаны в виде

$$\begin{aligned} F(e, p, \kappa, T) &= a_0(T - T_0) + \frac{a_1}{2} (I \cdot e)^2 + \frac{a_2}{2} \bar{e} \cdot \bar{e} + \frac{a_3}{2} p \cdot p + \\ &+ a_4 p \cdot \kappa + \frac{a_5}{2} \kappa \cdot \kappa + \frac{a_6}{2} (T - T_0)^2 + a_7 (T - T_0) I \cdot e + a_8 \kappa \cdot \bar{e}, \\ \sigma &= \rho [a_1 (I \cdot e) I + a_2 \bar{e} + a_7 (T - T_0) I + a_8 \kappa]. \end{aligned} \quad (2)$$

Из (2) видно, что в общем случае нет совпадения пластических деформаций с остаточными, т.к. при $\bar{\sigma} = 0$ имеем $\bar{\varepsilon}_{res} = -(a_8/a_2)\kappa + \bar{p}$. Уравнения упругопластичности при изотермическом процессе строятся из требования экстремальности функционала Лагранжа:

$$\int_{t_1}^{t_2} L dt = \int_{t_1}^{t_2} [D - \lambda \varphi] dt, \quad (3)$$

где $L = L(p, \kappa, \dot{p}, t)$; λ – неопределенный множитель Лагранжа. Экстремаль функционала (3) ищется варьированием по p и κ при фиксированных $p(t_1) = p_1$, $p(t_2) = p_2$, произвольных $\kappa(t_1)$ и $\kappa(t_2)$. Считается заданным путь в пространстве напряжений или полных деформаций. Условия транс-

версальности при этом выполняются автоматически. Уравнения Эйлера-Лагранжа для функционала (3) дают

$$a_4 \dot{p} = -\lambda \varphi_{,k}, \quad a_4 \dot{k} = \lambda \varphi_{,p} + \rho_0^{-1} \dot{\bar{\sigma}}, \quad (4)$$

где задавался путь в пространстве напряжений, $\varphi(\bar{\sigma}, p, k)$. Для задания модели требуется определить вид поверхности нагружения и множитель λ . Как показано в [6], требование независимости определяющих уравнений упругопластичности от пути (напряжений или полных деформаций), в котором изначально задается процесс деформирования, накладывает определенные ограничения на вид поверхности нагружения, с учетом которых

$$\varphi(\bar{\sigma}, p, k) \equiv \psi(\bar{\varepsilon}, p, k) \equiv \tilde{\varphi}(\bar{\varepsilon}, p, k) = K \cdot K - c_2 p \cdot p - K_0^2 = 0, \quad K = a_2 \bar{\varepsilon} - (a_4 - a_8)k - c_1 p,$$

где c_i, K_0 – материальные константы. Вышеупомянутые ограничения приводят к тому, что условие $\dot{\varphi} = 0$ (при активном нагружении) оставляет множитель Лагранжа λ неопределенным.

Уравнения (4) принимают вид

$$\dot{p} = 2\lambda k, \quad \dot{k} = -2\lambda(a_4 - a_8)^{-1}[(c_1 + a_2)K + c_2 p] + a_2(a_4 - a_8)^{-1} \dot{\bar{\varepsilon}}.$$

Введем далее функцию параметров состояния n , определением которой служит равенство $D = n \psi_{, \varepsilon} \cdot \dot{\bar{\varepsilon}}$. Из условия активного нагружения $\psi_{, \varepsilon} \cdot \dot{\bar{\varepsilon}} \geq 0$ следует, что для выполнения неравенства диссипации $D \geq 0$ необходимо и достаточно $n \geq 0$. λ однозначно выражается через n : $\lambda = a_2 n (\psi_{, \varepsilon} \cdot \dot{\bar{\varepsilon}}) / ((F_{\bar{\varepsilon}} - F_{\bar{p}}) \cdot \psi_{, \varepsilon})$. Отсюда видно, что уравнения упругопластичности (4) удовлетворяют требованию инвариантности относительно масштаба времени, если функция n является однородной нулевого порядка относительно скоростей параметров состояния. Будем полагать, что n является функцией (или функционалом) только параметров состояния и не зависит от их скоростей. Введем параметр μ_{σ} по определению: $\mu_{\sigma} = (\rho_0 a_2)^{-1} (\psi_{, \varepsilon} \cdot \dot{\bar{\sigma}}) / (\psi_{, \varepsilon} \cdot \dot{\bar{\varepsilon}})$. μ_{σ} связан с углом наклона касательной к кривой $\sigma - \varepsilon$ при простом растяжении (сжатии), кручении. При $\mu_{\sigma} = 1$ этот угол совпадает с углом наклона упругого участка, а при $\mu_{\sigma} = 0$ равен нулю. Для выполнения неравенства $P \geq 0$ при любых путях нагружения необходимо и достаточно [6]

$$(1 + \eta(1 - \beta)) \mu_{\sigma} \leq 1 - \eta\beta, \quad c_1 = -a_2 a_4 / a_8, \quad a_5 = (a_8 - a_4) a_8 / a_2, \quad (5)$$

$$\eta = a_2(a_3 - c_1) / c_2, \quad \beta = a_4 / a_8 < 1.$$

Условия (5) не зависят от конкретного вида n . Из (5) следует, что число независимых материальных констант уменьшается на две единицы (c_1 и a_5 выражаются через другие константы). Константы a_4 и a_8 входят в определяющие уравнения только в виде комбинации $\beta = a_4 / a_8$, что является следствием возможности изменения масштаба тензора k . Из $a_8 / (a_8 - a_4) \geq 0$ следует также условие $\beta < 1$. Первое неравенство (5) ограничивает возможные значения μ_{σ} . В [6] представлены соображения, из которых следует, что область изменения β должна быть ограничена условием $\beta < 0$. При этом условии угол наклона касательной к графику $\sigma - \varepsilon$ простого нагружения первоначально изотропного тела в начальный момент активного процесса $\mu_{\sigma 0} = \beta / (\beta - 1)$ больше нуля, но меньше упругого значения. Первое ограничение (5) представлено на рис. 1. На плоскости $\mu_{\sigma} - \eta$ выделяются три разрешенных квадранта (IV квадрант запрещен из-за возможности стягивания поверхности нагружения в точку). Каждому из них при простом нагружении первоначально изотропного тела соответствуют свои интервалы изменения η и c_2 . В I квадранте – $\eta \geq 0, c_2 > 0$, во II квадранте – $\eta < 0, c_2 > 0$, в III квадранте – $\eta < 0, c_2 < 0$. Материалам, соответствующим разным квадрантам, отвечают разные ограничения на возможные значения μ_{σ} .

Существует область значений η, c_2 , где $0 \leq \mu_{\sigma} \leq 1$ (I квадрант и часть III квадранта). Обычно подобное ограничение получают исходя из не имеющего термодинамического обоснования постулата Друкера. В другой части III квадранта допускаются значения $\mu_{\sigma} < 0$, соответствующие нали-

чию падающих участков на кривых $\sigma - \varepsilon$. Дальнейшее исследование потребовало конкретизации вида функции n . Пусть $n = n' a_2 \left[\frac{(F_{\bar{\varepsilon}} - F_{\bar{p}}) \cdot \psi_{\bar{\varepsilon}}}{(\psi_{\bar{\varepsilon}} \cdot \psi_{\bar{\varepsilon}})^2} \right]$. Такой выбор устраняет неограниченный рост параметра λ в случае, если $(F_{\bar{\varepsilon}} - F_{\bar{p}}) \cdot \psi_{\bar{\varepsilon}} \rightarrow 0$, и означает не более чем одну из возможностей конкретизации модели. В [6] найдены ограничения на n' : $0 \leq n' = \alpha N$, $\alpha \in [0; 1]$, обеспечивающие выполнение неравенств $P \geq 0$, $\mu_{\sigma} \leq 1$ при любых процессах деформирования. N выражается только через a_2 , c_2 , η , β . В некоторых областях значений материальных констант найденные ограничения обеспечивают выполнение условия $\mu_{\sigma} \geq 0$. В других случаях это условие выполняется при дополнительных ограничениях на N .

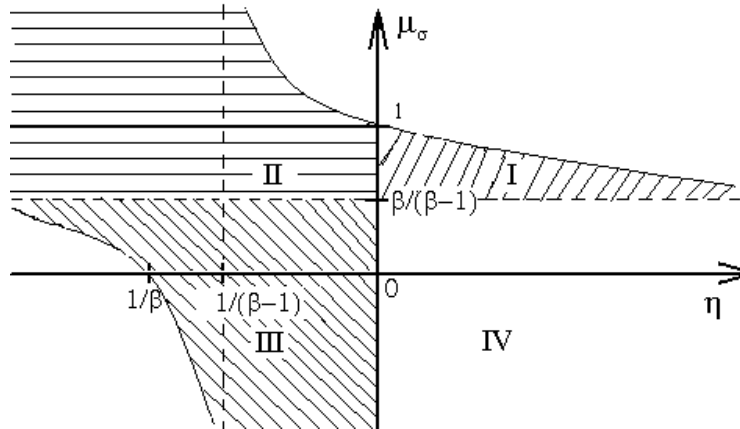


Рис. 1. Первое ограничение

При численном исследовании циклического нагружения в $n' = \alpha N$ введем зависимость от аналога параметра Одквиста R : $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 (1 - e^{-c_R \cdot R})$, $\dot{R} = \sqrt{\dot{k} \cdot \ddot{k}}$. Это позволило описать циклически упрочняющиеся и разупрочняющиеся материалы. На рис. 2-6 приведены некоторые результаты численных расчетов. В [6] было показано, что I квадрант (см. рис. 1) можно разбить на три зоны. В первой из них на кривой простого растяжения $\sigma - \varepsilon$ (кривая 1 на рис. 2) выпуклость на участке активного нагружения направлена вниз. Для материалов второй зоны (кривая 2 на рис. 2) существует точка перегиба на графике $\sigma - \varepsilon$, но предел μ_{σ} при $\varepsilon \rightarrow \infty$ больше $\mu_{\sigma 0}$. В третьей зоне (кривая 3 на рис. 2) $\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \mu_{\sigma} = \mu_{\sigma 0}$ и пластические деформации ограничены. Графики циклического растяжения-сжатия показывают существование предельного цикла как для циклически упрочняющихся, так и для циклически разупрочняющихся материалов. Для материалов первой зоны I квадранта предельным циклом является отрезок прямой, проходящей через начало координат (см. рис. 3). При достаточно малых значениях амплитуды продольной деформации первые циклы практически повторяют друг друга и лишь затем начинается циклическое упрочнение. Такое упрочнение наблюдается и при $n' = \text{const}$.

Графики простого и циклического нагружения для материалов, соответствующих II квадранту на рис. 1 качественно напоминают графики для материалов первой зоны I квадранта.

На рис. 4 показан график $\sigma - \varepsilon$ циклического растяжения-сжатия для циклически упрочняющегося материала второй зоны I квадранта на рис. 1.

Кривые простого растяжения для материалов, соответствующих III квадранту на рис. 1 показаны на рис. 5. Для этих материалов возможно наличие падающего участка на кривых $\sigma - \varepsilon$; пластические деформации ограничены.

На кривой циклического растяжения-сжатия после прохождения упругого участка выпуклость направлена во внешнюю сторону от центра $\sigma = 0$, $\varepsilon = 0$ (см. рис. 6).

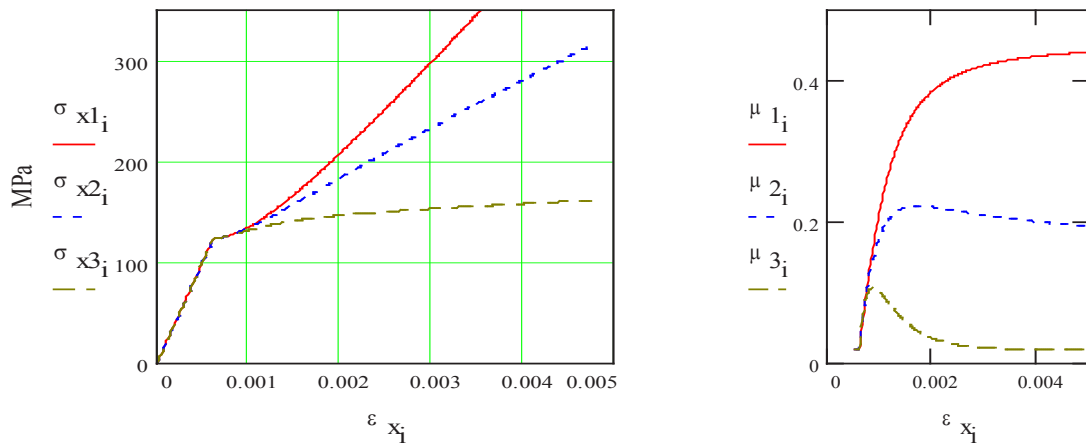


Рис. 2. Графики $\sigma - \varepsilon$, $\mu - \varepsilon$ при простом растяжении (I квадрант на рис. 1):
 $\rho_0 = 1$, $\kappa_0 = 100$ МПа, $a_0 = 1,3 \cdot 10^5$ МПа, $a_2 = a_4 = 1,6 \cdot 10^5$ МПа, $\beta = -0,02$, $c_2 = (10 \cdot c_1)^2$, $\alpha = 1$,
 $\eta = (a_2 / \sqrt{c_2}) \cdot s_i$: $s_1 = 0,25$, $s_2 = 0,75$, $s_3 = 2$

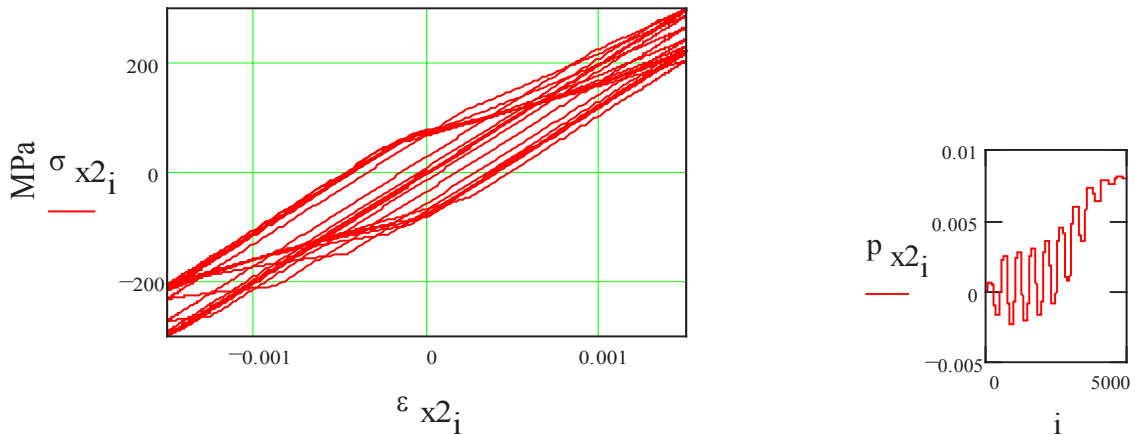


Рис. 3. Графики $\sigma - \varepsilon$, $p - t$. 10 циклов. ρ_0 , κ_0 , a_1 , a_2 , a_4 соответствуют рис. 2,
 $\eta = 0,1 \cdot (a_2 / \sqrt{c_2})$ – первая зона I квадранта на рис. 1, $c_2 = (0,2 \cdot c_1)^2$, $\beta = -0,7$, $(N = 7,2)$, $c_R = 500$,
 $\alpha_0 = 0,2$, $\alpha_1 = 0,8$, $\varepsilon_{\max} = 0,0015$

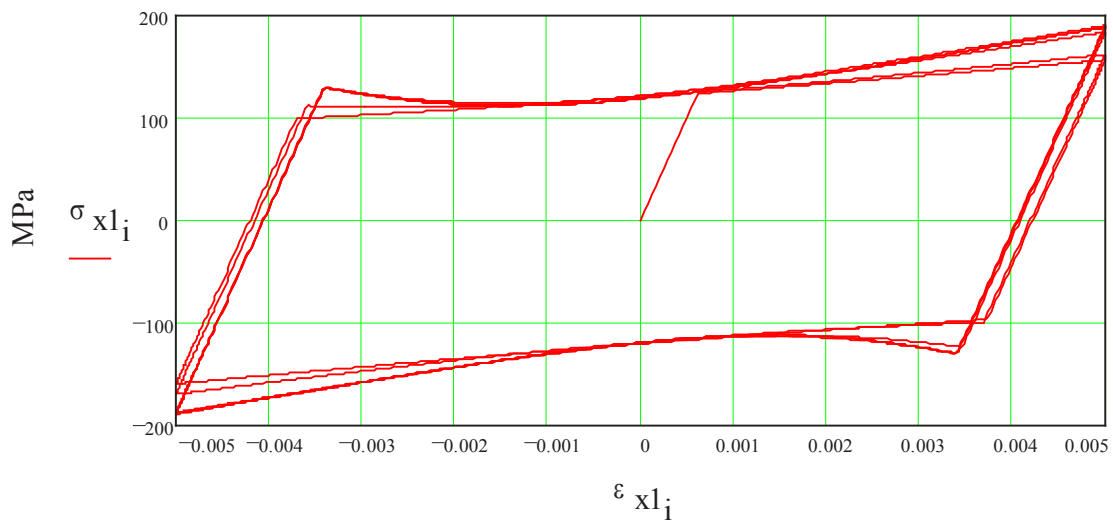


Рис. 4. График $\sigma - \varepsilon$, 6 циклов. $\eta = 0,75 \cdot (a_2 / \sqrt{c_2})$ – 2 зона I квадранта на рис. 1,
 ρ_0 , κ_0 , a_1 , a_2 , a_4 соответствуют рис. 2, $c_2 = (c_1)^2$, $\beta = -0,03$, $(N = 7,5)$, $c_R = 2 \cdot 10^3$, $\alpha_0 = 0,2$, $\alpha_1 = 0,8$

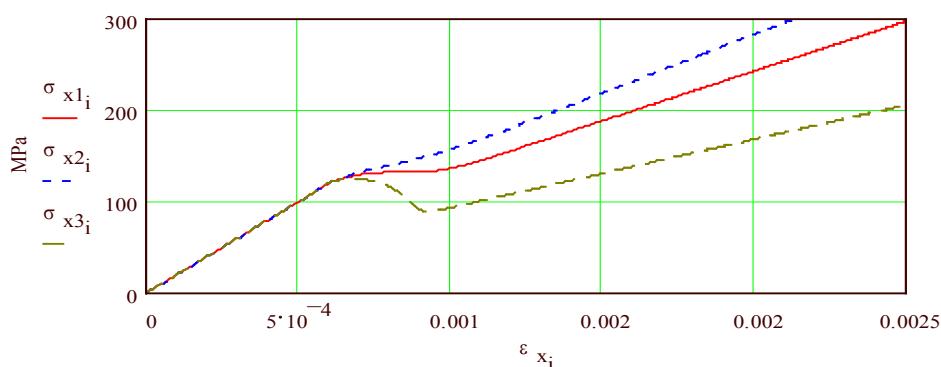


Рис. 5. Графики $\sigma - \varepsilon$ (III квадрант на рис. 1). $\rho_0, k_0, a_1, a_2, a_4$ соответствуют рис. 2, $\alpha = 1, \eta = -1, c_2 = -(0,5 \cdot c_1)^2, \beta = -s_i : s_1 = 1, s_2 = 1,5, s_3 = 0,5$

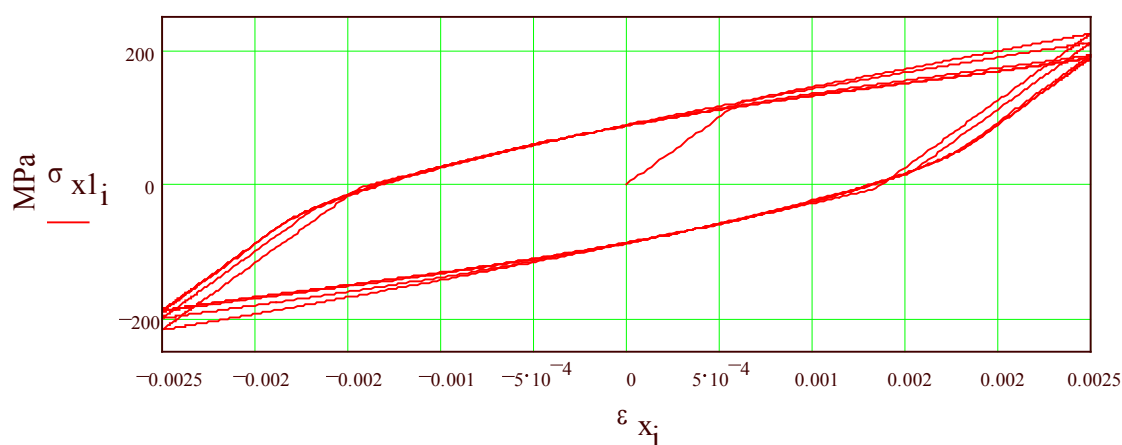


Рис. 6. Графики $\sigma - \varepsilon$, 5 циклов. $\rho_0, k_0, a_1, a_2, a_4$ соответствуют рис. 2, $\eta = -3, c_2 = -(0,5c_1)^2$ – III квадрант рис. 1, $\beta = -0,33, (N = 3), \alpha_0 = 0,4, \alpha_1 = 0,6, c_R = 1,3 \cdot 10^3$

Представленные численные расчеты показывают, что несмотря на относительную простоту модели они описывают широкий класс материалов, которым соответствуют сложные кривые простого и циклического нагружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарь, В. С. Математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений при циклических нагружениях / В. С. Бондарь, В. В. Даншин, Д. А. Макаров // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2014. – № 2. – С. 125-152.
2. Друкер, Д. О постулате устойчивости материала в механике сплошной среды / Д. Друкер // Механика. – 1964. – № 3. – С. 115-128.
3. Темис, Ю. М. Математическое моделирование циклического деформирования / Ю. М. Темис, Х. Х. Азметов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2011. – № 2. – С. 195-202.
4. Шитиков, А. В. Конечные деформации упругопластических сред / А. В. Шитиков, Г. И. Быковцев // ДАН. – 1990. – Т. 311. – № 1. – С. 59-62.
5. Шитиков, А. В. О вариационном принципе построения уравнений упругопластичности при конечных деформациях / А. В. Шитиков // ПММ. – 1995. – Т. 59, № 1. – С. 158-161.
6. Шитиков, А. В. Термодинамический подход к построению модели упрочняющегося упругопластического тела / А. В. Шитиков, С. А. Шитиков // Проблемы механики сплошных сред и элементов конструкций: сб. науч. тр. к 60-летию проф. Г. И. Быковцева. – Владивосток: Дальнаука, 1999. – С. 120-141.
7. Шитиков, А. В. Феноменологическая теория конечных упругопластических деформаций / А. В. Шитиков // Актуальные проблемы механики сплошных сред: сб. науч. тр. – Свердловск: Свердловский инженерно-педагогический институт, 1988. – С. 97-106.
8. Chaboche J.-L., Kanouté P., Azzouz F. Cyclic inelastic constitutive equations and their impact on the fatigue life predictions // Int. J. of Plasticity. – 2012. – Vol. 35. – P. 44-66.



Тарануха Н. А., Васильев А. С., Резниченко А. Ю.
N. A. Taranukha, A. S. Vasiliev, A. Yu. Reznichenko

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УСИЛЕННЫХ ПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПРИ РАЗРУШАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ

NUMERICAL RESEARCH OF ENHANCED HOLLOW SLABS IN THE STRESS-STRAIN STATE UNDER THE DESTROYING LOAD

Тарануха Николай Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 7 (4217) 54-30-74. E-mail: taranukha@knastu.ru.

Mr. Nikolay A. Taranukha – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Shipbuilding Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, 27 Lenina pr.; tel. 7 (4217) 54-30-74. E-mail: taranukha@knastu.ru.

Васильев Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, старший преподаватель Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (Россия, Биробиджан); 679015, ул. Широкая 70а. E-mail: vasil-grunt@mail.ru.

Mr Alexei S. Vasiliev – PhD in Engineering, a Senior Lecturer, Sholom-Aleichem Priamursky State University (Russia, Birobidzhan); 679015, 70a Shirokaya str. E-mail: vasil-grunt@mail.ru.

Резниченко Алина Юрьевна – магистрант Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (Россия, Биробиджан); 679015, ул. Широкая 70а. E-mail: r.eznichenkoo_alina@mail.ru.

Mrs. Reznichenko Yu. Alina – Master' Degree student, Sholom-Aleichem Priamursky State University (Russia, Birobidzhan); 679015, 70a Shirokaya str. E-mail: r.eznichenkoo_alina@mail.ru.

Аннотация. В данной статье выполнено исследование напряженно-деформированного состояния усиленных пустотных плит. Представлены численные и аналитические расчеты пустотных плит, усиленных и без усиления. Аналитические расчеты выполнялись согласно нормативным документам. Численное моделирование выполнялось в ПК ANSYS. При этом в ANSYS выполнялось моделирование и расчет как пустотной плиты в ее естественной форме, так и расчет этой же плиты, представленной в форме двутавровой балки с уменьшением площади сечения исходя из площади пустот в плите. В результате исследования были получены численные расчеты напряженно-деформированного состояния пустотных плит в двух представлениях, а также схемы трещин на разных стадиях разрушения. Цель данного исследования – выяснить, как и насколько будут отличаться результаты численных расчетов пустотной плиты при разрушающей нагрузке, моделируя ее в естественной и упрощенной двутавровой форме. При этом расчеты выполнены в нелинейной постановке при разрушающей нагрузке с образованием пластического шарнира в растянутой зоне сечения плиты. Приблизительная разрушающая нагрузка устанавливалась в результате аналитического расчета. Сопоставление расчетов показывает, что представление усиленных плит в форме двутавровых балок для расчетов имеет погрешности. И эта погрешность может быть разной в зависимости от метода усиления конструкции.

Summary. In this paper, the stress-strain state of enhanced hollow slabs is investigated. Numerical and analytical calculations of hollow slabs (enhanced and without amplification) are presented. Analytical calculations were carried out in accordance with specification documents. Numerical simulation was performed in ANSYS PC. In ANSYS, simulation and calculation of a hollow slab in its natural form and calculation of the same plate in the form of a T-beam with a reduction in the cross-sectional width by the sum of the diameters of each hollow hole in the slab were performed. As a result of the study, numerical calculations of the stress-strain state of the hollow slabs in two representations, and fracture schemes at different stages of destruction were obtained. The purpose of this study is to find out how and how much the results of numerical calculations of a hollow slab with a destructive load in simulation in a natural and simplified T-shape will differ. In this case, the calculations are performed in a nonlinear setting with a breaking load, with the formation of a plastic hinge in the stretched section of the slab. An approximate destructive load was established as a result of an analytical calculation. Comparison of calculations shows that

the representation of enhanced slabs in the form of T-beams for calculations has the inaccuracies, which depend on the method of strengthening the construction.

Ключевые слова: математическое моделирование; численное исследование; усиление; железобетонные конструкции; пустотная плита; напряженно-деформированное состояние; прогиб; двутавровая балка.

Key words: mathematical modeling; numerical research; strengthening; reinforced concrete structures; hollow slab; stress-strain state; deflection; t-beam.

УДК 624,69.04

Введение

Пустотные плиты активно используются в строительстве и служат перекрытиями между этажами. Их основное преимущество – небольшой вес в сравнении с обычными плитами, что позволяет увеличивать их длину для перекрытия относительно больших пролетов. Необходимость усиления пустотных плит может быть обусловлена рядом причин. Довольно распространенными причинами являются: увеличение нагрузок на несущие элементы в результате замены либо усиления вышерасположенных конструкций (перестройка помещений, надстройка зданий); модернизация технологического оборудования в реконструируемом здании, изменение технологических процессов.

Существуют различные методы усиления железобетонных плит, что позволяет выбрать из многообразия необходимый вариант конкретного усиления. Рассмотренные в данной статье виды усиления пустотных железобетонных плит [1; 7]:

1. усиление плиты методом наращивания сечения (набетонка);
2. усиление плиты методом дополнительного армирования;
3. усиление плиты комбинированным способом.

В данной работе выполняется исследование пустотных плит при действии разрушающей нагрузки, усиленных и без усиления. Для аналитического расчета пустотная плита была представлена в форме двутавровой балки с уменьшением ширины сечения на сумму диаметров каждого пустотного отверстия в плите. В ПК ANSYS плита моделируется как в естественной форме, так и в упрощенной, в форме двутавра [3; 4; 9]. Отметим, что представление пустотных плит в форме двутавровой балки применяется, например, в ПК ЛИРА – известной программе для расчета строительных конструкций на основе метода конечных элементов. Важный вопрос: насколько целесообразно представлять таким способом пустотные плиты при расчете, и насколько велико будет отклонение. Приблизительная разрушающая нагрузка устанавливалась в результате аналитического расчета с использованием нормативной документации [2; 6; 7].

Сопоставление расчетов показывает, что прогибы, напряжения в арматуре, нормальные напряжения в бетоне по высоте сечения разнятся в зависимости от того, как представлена плита: в форме двутавра или в ее естественной форме.

Численное исследование напряженно-деформированного состояния усиленных пустотных плит средствами ПК ANSYS

Проектирование плит выполнялось в модуле программы ANSYS Design Modeller. Затем осуществлялся расчет в ANSYS Mechanical. Для железобетона использовался конечный элемент (КЭ) Solid 65, позволяющий выполнять нелинейные расчеты с учетом модели разрушения Willam-Warnke. Для отображения трещин была добавлена пользовательская функция в форме деформационного критерия Базанта, позволяющего учитывать трещинообразование в плитах и визуализировать этот процесс средствами ANSYS. Также по краям были смоделированы опоры, на которых держится плита. Конечно-элементная сетка использовала КЭ в форме гексаэдра с максимальным размером 20 мм (см. рис. 1). Распределенная нагрузка, действующая на плиту, была приблизительно получена из аналитических расчетов. В результате выполнялось нагружение плит фиксированной нагрузкой. На первом шаге приложения разрушающей нагрузки образовывался пластический шарнир, происходило смещение нейтральной оси в сжатую зону и перераспределение уси-

лий внутри плиты, обусловленное ползучестью бетона. На следующем шаге происходило непосредственно разрушение, обусловленное превышением предела текучести в арматуре и разрушением плиты. На каждом шаге фиксировались нормальные напряжения в бетоне и арматуре, а также прогибы.

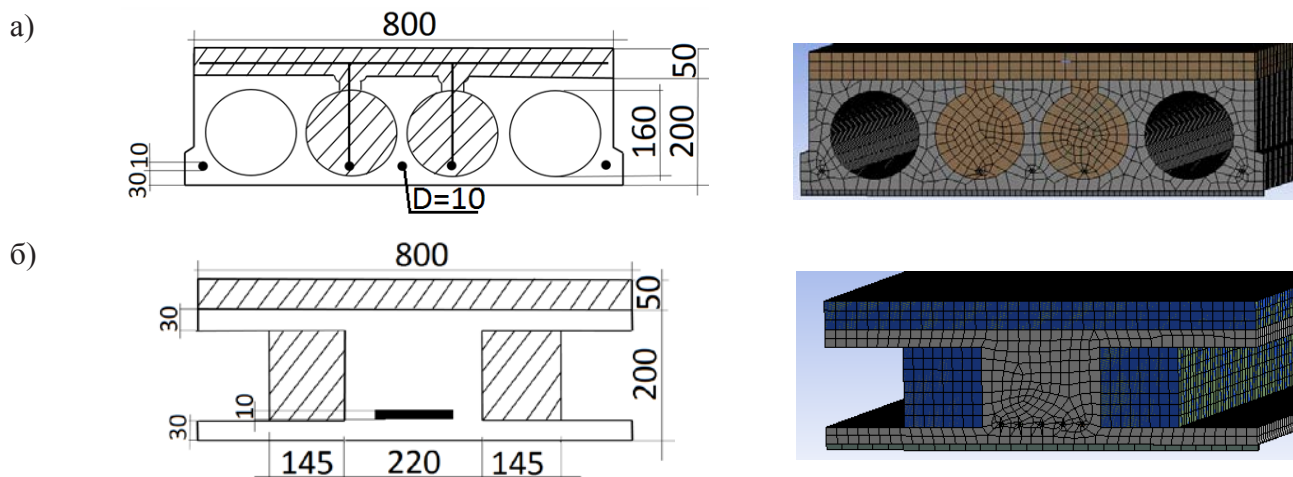


Рис. 1. Сечения пустотной железобетонной плиты, усиленной комбинированным способом, представленные в естественной форме (а) и в форме двутавра (б)

Для исследования взята пустотная плита (по типу ПБ 41-9-8) со следующими характеристиками: номинальные размеры плиты в плане $0,8 \times 4$ м ($L = 4000$ мм, $b = 800$ мм); высота $h = 200$ мм; бетон тяжелый, подвергнутый тепловой обработке, класса В25 ($R_{b1} = 14,5$ МПа, $R_{bt1} = 1,05$ МПа, $E_{b1} = 3 \cdot 10^4$ МПа); рабочая продольная арматура А400 ($R_s = 365$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа) стержневая 3 штуки диаметром 18 мм ($R_s = 365$ МПа). Геометрические характеристики приведены на рис. 2 [5; 8].

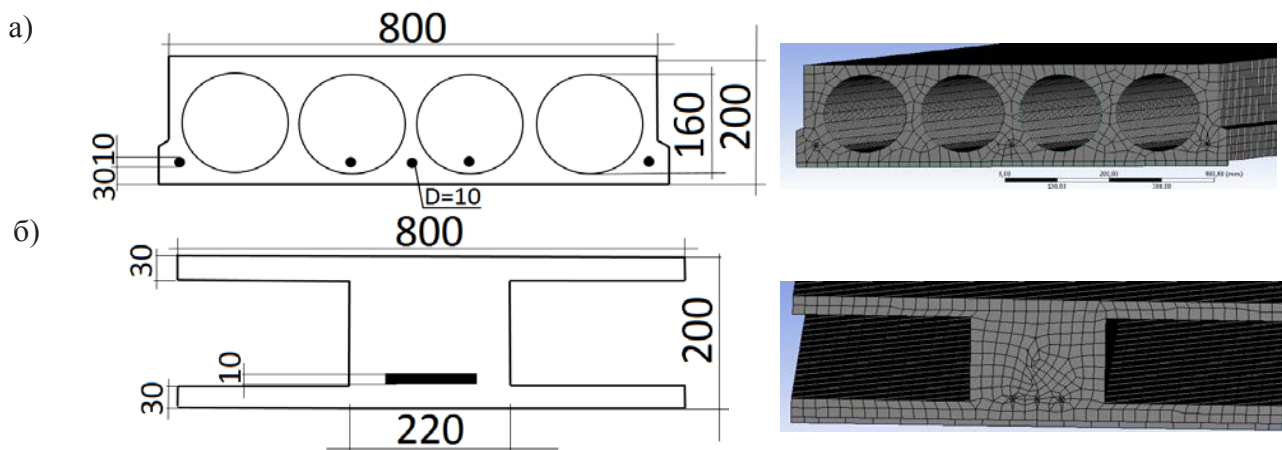


Рис. 2. Сечения пустотной железобетонной плиты без усиления представленные в естественной форме (а) и в форме двутавра (б)

Данные об усилении:

- 1-й способ усиления – наращение бетона толщиной 50 мм на верхней части плиты. Характеристики: бетон класса В30 ($R_{b2} = 17$ МПа, $R_{bt2} = 1,15$ МПа, $E_{b2} = 33 \cdot 10^4$ МПа);
- 2-й способ усиления – это применение дополнительной арматуры в растянутой зоне: рабочая продольная арматура стержневая 2 штуки диаметром по 10 мм класса А400 ($R_s = 365$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа);

- 3-й способ – усиление комбинированным способом: 50 мм наращивания бетона класса В30 ($R_{b2} = 17$ МПа, $R_{bt2} = 1,15$ МПа, $E_{b2} = 33 \cdot 10^4$ МПа) плюс дополнительная арматура в растянутой зоне, рабочая продольная арматура стержневая 2 штуки диаметром по 10 мм класса А400 ($R_s = 365$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа).

Усиление комбинированным способом представлено на рис. 1.

Геометрические характеристикам плиты в форме двутавра расчетного сечения определялись согласно способу [2]:

Определение приведенной высоты пустоты h , мм:

$$h = \frac{r}{2} \cdot \sqrt{12},$$

$$h = \frac{0,080}{2} \cdot \sqrt{12} = 138 \text{ мм.}$$

Определение суммарной площади пустот $A_{\text{пуст}}$, м²:

$$A_{\text{пуст}} = \pi \cdot n \cdot r^2,$$

$$A_{\text{пуст}} = 3,14 \cdot 2 \cdot 0,08^2 = 0,04 \text{ м}^2,$$

где $\pi = 3,14$; n – количество пустот; r – радиус пустоты.

Определение суммарной площади заполненных пустот $A_{\text{пуст.зап}}$, м²:

$$A_{\text{пуст.зап}} = \pi \cdot n \cdot r^2 = 3,14 \cdot 2 \cdot 0,08^2 = 0,04 \text{ м}^2.$$

Определение приведенной ширины оставшихся пустот $b_{\text{пуст}}$, м:

$$b_{\text{пуст}} = \frac{A_{\text{пуст}}}{h},$$

$$b_{\text{пуст}} = \frac{0,04}{0,138} = 0,29.$$

Определение приведенной ширины заполненных пустот $b_{\text{пуст.зап}}$, м:

$$b_{\text{пуст.зап}} = \frac{0,04}{0,138} = 0,29.$$

Определение ширины ребра двутавра b , м:

$$b = b'_f - b_{\text{пуст}},$$

$$b = 0,8 - 0,579 = 0,22$$

или

$$b = 0,8 - 0,29 - 0,29 = 0,22.$$

В табл. 1 представлены результаты расчетов прогибов усиленных пустотных плит от разрушающей нагрузки, рассчитанных в ПК ANSYS для пустотной плиты в натуральной форме и в форме двутавра, а также аналитически.

В табл. 2 приведены отклонения расчетов прогибов для пустотной плиты, рассчитанной в ANSYS. За эталон принято представление плиты в натуральной форме.



Таблица 1

Прогибы для всех видов рассматриваемых плит

| Шаг нагрузки | Рассматриваемые плиты | Расчет в ANSYS натуральной плиты, прогиб f , мм | Расчет в ANSYS плиты в форме двутавра, прогиб f , мм |
|--------------|---|---|--|
| Первый | Плита без усиления при разрушающей нагрузке $q = 6,15$ кН/м | 1,53 | 1,67 |
| | Плита, усиленная наращением в 50 мм, при разрушающей нагрузке $q = 9,43$ кН/м | 1,14 | 1,25 |
| | Плита, усиленная дополнительным армированием, при разрушающей нагрузке $q = 10,89$ кН/м | 2,25 | 2,37 |
| | Плита, усиленная комбинированным способом, при разрушающей нагрузке $q = 22,44$ кН/м | 2,34 | 2,42 |
| Последний | Плита без усиления при разрушающей нагрузке $q = 6,15$ кН/м | 15,47 | 17,58 |
| | Плита, усиленная наращением в 50 мм, при разрушающей нагрузке $q = 9,43$ кН/м | 13,14 | 13,67 |
| | Плита, усиленная дополнительным армированием, при разрушающей нагрузке $q = 10,89$ кН/м | 16,487 | 19,45 |
| | Плита, усиленная комбинированным способом, при разрушающей нагрузке $q = 22,44$ кН/м | 23,42 | 24,02 |

Таблица 2

Отклонения расчета прогибов

| Рассматриваемые плиты | Отклонения расчета прогибов в ANSYS натуральной плиты от расчета ANSYS плиты в форме двутавра на первом шаге, % | Отклонения расчета прогибов в ANSYS натуральной плиты от расчета ANSYS плиты в форме двутавра при разрушении, % |
|---|---|---|
| Плита без усиления при разрушающей нагрузке $q = 6,15$ кН/м | 9,1 | 13,6 |
| Плита, усиленная наращением в 50 мм, при разрушающей нагрузке $q = 9,43$ кН/м | 9,6 | 4 |
| Плита, усиленная дополнительным армированием, при разрушающей нагрузке $q = 10,89$ кН/м | 5,3 | 18 |
| Плита, усиленная комбинированным способом, при разрушающей нагрузке $q = 22,44$ кН/м | 3,4 | 2,5 |

На рис. 3 показаны прогибы в программе ANSYS для плиты, усиленной комбинированным способом в естественной форме, а также плиты в форме двутавра при разрушающей нагрузке. На

рис. 4 представлены напряжения в арматуре на шаге перед разрушением плиты без усиления, смоделированной в ее естественной форме. В табл. 3 сведены полученные результаты нормальных напряжений в арматуре рассматриваемых плит перекрытий для плиты в естественной форме и форме двутавра. За эталон принята натуральная плита.

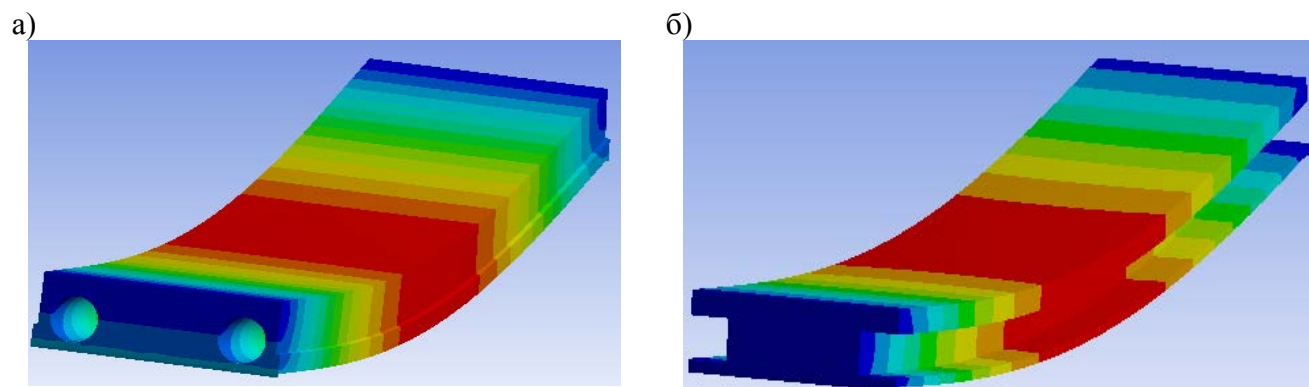


Рис. 3. Отображение прогибов в ANSYS: а – пустотной плиты в натуральной форме, б – пустотной плиты в форме двутавра

Таблица 3

Нормальные напряжения в арматуре рассматриваемых плит перед разрушением

| Рассматриваемые плиты | Расчет в ANSYS натуральной плиты, напряжения, МПа | Расчет в ANSYS плиты в форме двутавра, напряжения, МПа | Отклонения напряжения в арматуре для плиты в форме двутавра от натуральной пустотной плиты, % |
|--|---|--|---|
| Нормальные напряжения в арматуре для плиты без усиления | 302,05 | 339,76 | 12,5 |
| Нормальные напряжения в арматуре для плиты, усиленной наращиванием сечения | 333,25 | 338,92 | 1,7 |
| Нормальные напряжения в арматуре для плиты, усиленной дополнительной арматурой | 294,66 | 354,71 | 20,3 |
| Нормальные напряжения в арматуре для плиты, усиленной комбинированным способом | 200,06 | 220,8 | 9,4 |

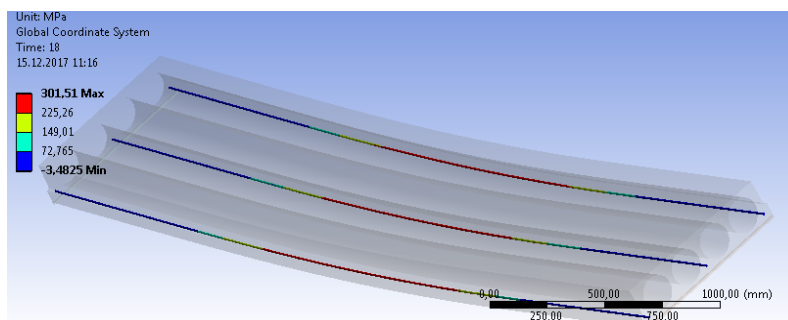


Рис. 4. Напряжения в арматуре на шаге перед разрушением

На рис. 5 показано сопоставление графиков нормальных напряжений по высоте сечения плиты при первом шаге нагрузки. Равенство напряжений нулю в нижней части сечения плиты показывает, что там произошло разрушение конечных элементов и эта часть сечения в работе не участвует. Немного выше, но все еще в растянутой зоне плиты можно наблюдать небольшую величину растягивающих напряжений, однако в месте, где размещена арматура, напряжение большое, хотя оно и не превышает нормативные значения в 365 МПа. Как показано на рис. 5, а, распределения напряжений по высоте сечения плиты без усиления для плиты в форме двутавра составили около 0,8 МПа при растяжении и -2,9 МПа при сжатии волокон. Для пустотной плиты без усиления 1,1 МПа при растяжении и -2,7 МПа при сжатии. На рис. 5, б показаны графики распределения напряжения по высоте сечения для плиты, усиленной наращением. Значения нормальных напряжений для плиты в форме двутавра составили около 1,1 МПа при растяжении и -1,3 МПа при сжатии волокон. Для пустотной плиты, усиленной наращением, 1 МПа при растяжении и -1,2 МПа при сжатии. На рис. 5, в показаны графики распределения напряжения по высоте сечения усиленной плиты дополнительным армированием: для плиты в форме двутавра составили около 0,9 МПа при растяжении и -4,3 МПа при сжатии волокон. Для пустотной плиты, усиленной дополнительным армированием, 0,9 МПа при растяжении и -4 МПа при сжатии. На рис. 5, г показаны графики распределения напряжения по высоте сечения усиленной плиты комбинированным способом, для плиты в форме двутавра: около 0,45 МПа при растяжении и -2,9 МПа при сжатии волокон. Для пустотной плиты, усиленной комбинированным способом, 0,55 МПа при растяжении и -2,9 МПа при сжатии.

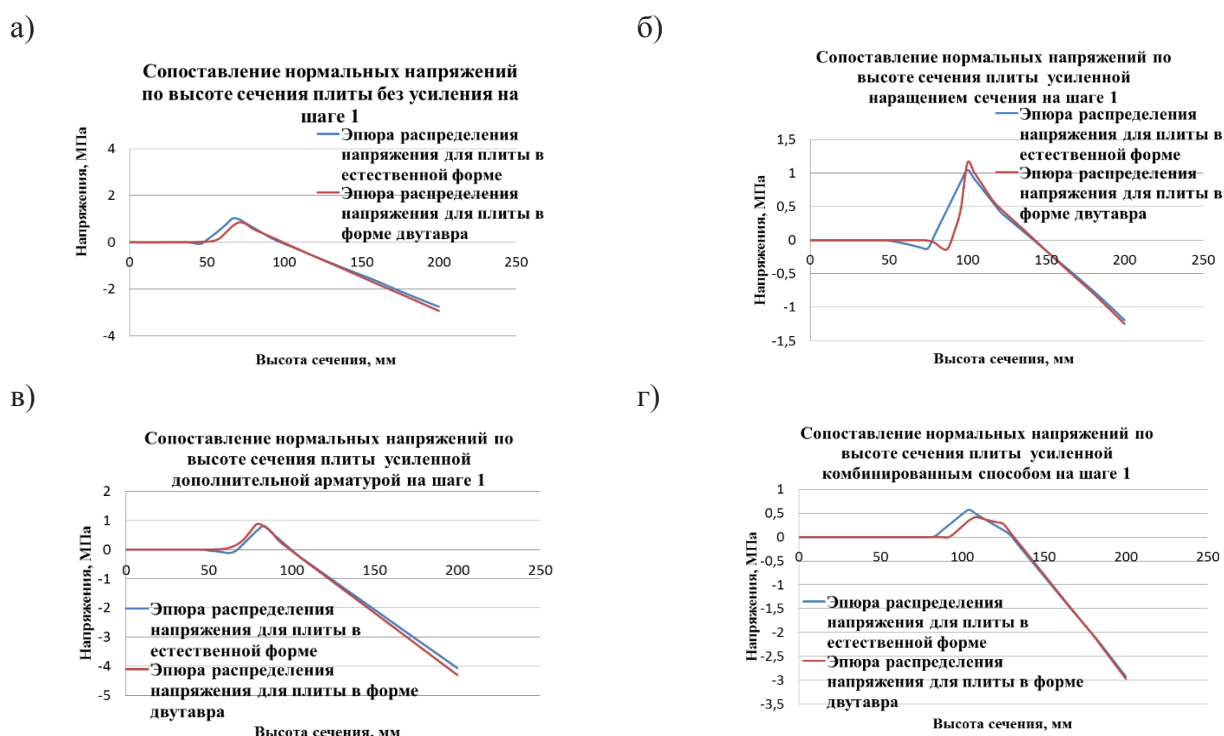


Рис. 5. Сопоставление нормальных напряжений по высоте сечения плит на шаге 1: а – без усиления; б – усиленной наращиванием сечения; в – усиленной дополнительной арматурой; г – усиленной комбинированным способом

На рис. 6 показано сопоставление графиков нормальных напряжений по высоте сечения плиты на втором шаге нагрузки. В целом из рис. 6 видно, что напряжения, равные нулю в нижней части сечения плиты, для плиты в форме двутавра такие же, как и для пустотной плиты. Значение напряжения на последнем шаге нагрузки по высоте сечения для плиты в естественной форме и для плиты в форме двутавра одинаковы.

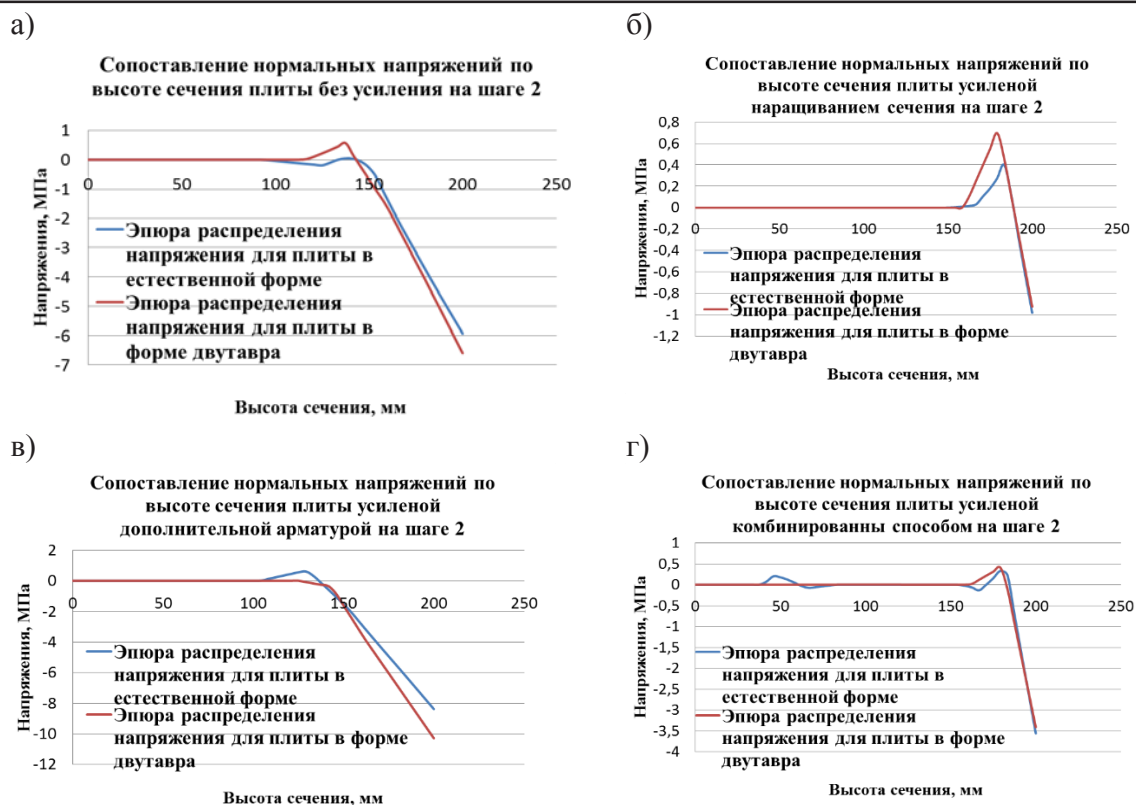


Рис. 6. Сопоставление нормальных напряжений по высоте сечения для плиты на шаге 2: а – без усиления; б – усиленной наращиванием сечения; в – усиленной дополнительной арматурой; г – усиленной комбинированным способом

На рис. 7 показано трещинообразование в плите на стадии разрушения.

Заключение.

Из выполненного исследования можно сделать ряд выводов.

1. Исследование погибов усиленных пустотных плит от разрушающей нагрузки, рассчитанных в ПК ANSYS для пустотной плиты в натуральной форме и в форме двутавра, а также аналитически, показало, что результат прогибов плиты в той или иной форме различается. Отклонение расчета в ANSYS прогибов натуральной плиты от плиты в форме двутавра при разрушении: для плиты без усиления составило 13,6 %; для плиты, усиленной наращением сечения, составило 4 %; для плиты, усиленной дополнительным армированием, составило 18 %; для плиты, усиленной комбинированным способом, составило 2,5 %. Это значит, что в действительности плита, представляемая в естественной форме для расчетов, менее жесткая, чем представленная в форме двутавра.

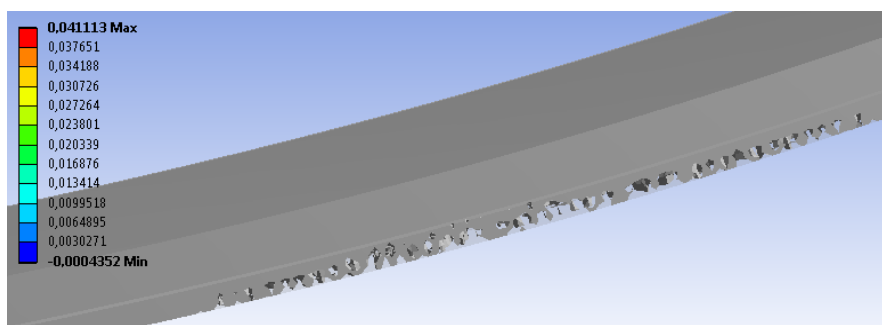


Рис. 7. Появление трещин в плите



2. Отклонения напряжения в арматуре расчета в ANSYS натуральной пустотной плиты от расчета в ANSYS плиты в форме двутавра: для плиты без усиления составило 12,5 %; для плиты, усиленной наращением сечения, составило 1,7 %; для плиты, усиленной дополнительным армированием, составило 20,3 %; для плиты, усиленной комбинированным способом, составило 9,4 %.

3. Максимальное напряжение по высоте сечения плиты на первом шаге нагрузки для плиты в форме двутавра выше, чем для плиты в естественной форме в среднем на 26 % для различных способов усиления. Максимальное напряжение по высоте сечения плиты на втором шаге при разрушении для плиты в форме двутавра приблизительно одинаково с естественным представлением плиты. При этом после первого шага нейтральная ось смещается меньше в сторону сжатой зоны для плиты в естественной форме. Это значит, что прочностные характеристики плиты при представлении ее в естественной форме немного выше.

4. На втором шаге нагружения (при разрушении) также можно заметить более медленный рост нормальных напряжений по сечению плиты, смоделированной в естественной форме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гучкин, И. С. Диагностика состояния и проектирование усиления железобетонных балок: учеб. пособие / И. С. Гучкин, А. В. Панков. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 120 с.
2. Климов, С. В. Проектирование и расчет железобетонных многопустотных плит перекрытий / С. В. Климов, Т. В. Юрина, С. Л. Бугаев. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 79 с.
3. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в расчетах пространственных железобетонных конструкций / С. Ф. Клованич, Д. И. Безушко. – Одесса: Изд-во ОНМУ, 2009. – 89 с.
4. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона / С. Ф. Клованич, И. Н. Мироненко. – Одесса: Изд-во Одесского нац. морского ун-та, 2007. – 111 с.
5. Муленкова, В. И. Расчет и конструирование усиления железобетонных и каменных конструкций: учеб. пособие / В. И. Муленкова, Д. В. Артюшин. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 118 с.
6. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003) / ОАО «ЦНИИпромзданий»; ГУП «НИИЖБ». – М.: [б.и.], 2005.
7. Рекомендации по усилению и ремонту строительных конструкций инженерных сооружений. – Введ. 1997.01.01. – Актуал. 2017.02.01. – ЦНИИпромзданий, 1997.
8. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2003.
9. Lee, H. H. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 14. Theory, Applications, Case Studies / H. H. Lee. – SDC PUBLICATIONS Schroff Development Corporation. BetterTextbooks. LowerPrices / www.SDCpublications.com, 2012. – 619 p.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICA ENGINEERING

Мокрицкий Б. Я., Усова Т. И.
B. Ya. Mokritskii, T. I. Usova

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАСШИРЕНИЯ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ВИДЕОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ**

**STUDY OF EXPANSION POSSIBILITY OF A VIDEO MEASURING MACHINE
APPLICATION**

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: boris@knastu.ru.

Mr. Boris Ya. Mokritskii – Doctor of Engineering, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: boris@knastu.ru.

Усова Татьяна Ивановна – магистрант кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: usova-tanya95@mail.ru.

Mrs. Tatiana I. Usova – Master 's Degree Student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: usova-tanya95@mail.ru.

Аннотация. В составе современных промышленных изделий всё чаще применяются детали, выполненные из материалов (композиционных, полимерных и т.д.), имеющих низкую отражательную способность. Это их свойство затрудняет или исключает возможность проведения ряда исследований на микроскопах и видеоизмерительных машинах (мультисенсорных центрах). Номенклатура таких материалов растёт, они находят применение в космонавтике и авиастроении, а темпы разработки методов контроля в них дефектов отстают, в том числе применение таких материалов сдерживается из-за отсутствия соответствующего оборудования. Более того, существующая система закупок не позволяет получить необходимое оборудование ранее полугода. Зачастую при постановке изделия на производство такого запаса времени у производителя нет. В силу этого актуализируется необходимость поиска возможностей применения для указанной проблемы контроля дефектов уже имеющегося на предприятиях оборудования. Одним из видов такого современного оборудования в структуре службы главного метролога являются видеоизмерительные машины. Они не предназначены для работы с такими материалами, но их хорошие оптические возможности, программное обеспечение, система освещения и подсветки подталкивают к исследованию возможности их применения. В данной работе приведены экспериментальные исследования возможности применения видеоизмерительной машины MicroVuSol 161 для контроля дефектов в виде трещин (разрешение на применение в РФ имеется). Возможность применения рассмотрена применительно к контролю материалов, применяемых в составе авиационной техники (фонарь и т.д.).

Summary. In modern industrial products parts made of materials (composite, polymer, etc.) having a low reflectivity are widely used. This property makes it difficult or excludes the possibility of conducting a number of studies using the microscope and video-measuring machines (multisensory centers). The list of such materials is growing; they find application in astronautics and aircraft building. However, the pace of development of defect controlling methods falls behind. The use of such materials is restrained because of the absence of appropriate equipment. Moreover, the existing purchasing system does not allow obtaining the necessary equipment for less than half a year. The manufacturer does not have so much time to start producing the equipment. As a result, one should find the possibility of using the equipment already available at enterprises to control defects. One of the types of such modern equipment available by chief metrologist are video measuring machines. They are not designed to work with such materials, but their good optical capabilities, software, lighting systems make them possible to use. In this paper, experimental studies of using the MicroVuSol 161 video-measuring machine for the detection of cracks are given (permission to use in the Russian Federation is available). The possibility of application has been considered with reference to the control of materials used in aviation equipment (torch, etc.).

Ключевые слова: видеоизмерительная машина, низкая отражательная способность материалов.

Key words: video-measuring machine, low reflectivity of materials.

УДК 621.022.3;669.2;666.1.013

Введение

В составе современных промышленных изделий всё чаще применяются детали, выполненные из материалов (композиционных, полимерных и т.д.), у которых традиционными оптическими методами затруднительно выявить дефекты в виде трещин. Номенклатура таких материалов растёт, они находят применение в космонавтике и авиастроении, а темпы разработки методов контроля в них дефектов отстают. При постановке изделия на производство изготовитель всё чаще сталкивается либо с проблемой длительности закупки оборудования (процедура закупки по федеральному законодательству не позволяет получить изделие ранее полугода), либо с необходимостью адаптировать какое-то из имеющегося у него оборудования под задачи оценки качества детали, выполненной из таких материалов.

В работе приведены результаты исследования возможности применения для контроля дефектов в виде трещин видеоизмерительной машины MicroVuSol 161.

Обсуждение полученных результатов

Проблема касается нескольких отраслей. Так, например, для автомобильных стёкол (триплекс) и строительных стекол проблема выявления дефектов важна с позиции обеспечения последующего заделывания трещин. Но есть области, где дефект служит причиной бракования стекла, заделывание трещин исключено.

Низкая отражательная способность ряда конструкционных материалов является серьёзным препятствием в выявлении дефектов в ответственных деталях авиационного назначения. Проблема подразделяется на две: обнаружение дефекта и измерение его параметров (хотя бы размеров). Наиболее полно эта проблема описана в работах С. С. Солнцева [1; 2], где изложены современные представления о хрупком разрушении стекла, методы анализа изломов и трещин на примере силикатных стекол и ситаллов [3]. Он отмечает ограниченные возможности ультразвукового метода (позволяет выявить только очень большие трещины), необходимость визуального (отмечают инородные включения и дефекты) и макроскопического (под микроскопом возможно выявить особенности строения отдельных участков излома) осмотра изделий, сложность и ограниченность капиллярной дефектоскопии (неприменим при закрытых трещинах). Отмечается общий недостаток для оптических средств – сложность и невозможность фокусировки изображения из-за криволинейности поверхности разрушения.

Для более сложных материалов (спецстёкла авиационного назначения, полистирол, композиционные материалы) методики и оборудование для выявления дефектов отсутствуют. Национальный стандарт РФ [4] даёт описание более 30 видов дефектов в стекле, но не содержит информации о методах их выявления. Примеры трещин на лобовом стекле автомобиля приведены на рис. 1.

Одним из видов современного оборудования в структуре службы главного метролога являются видеоизмерительные машины. Они не предназначены для работы с такими материалами, но их хорошие оптические возможности, программное обеспечение, система освещения и подсветки подталкивают к исследованию возможности их применения.

Нами рассмотрена возможность применения видеоизмерительной машины модели MicroVuSol 161 (разрешена к применению в РФ) для исследования дефектов типа трещин. Дефекты на образцах формировали (см. прим. 1) на микротвёрдомерах и твёрдомерах стандартными инденторами (конус, пирамидка Берковича, шарик) при регламентированной величине нагрузки (нагрузка от 50 до 200 г при нагружении на микротвёрдомере модели ПМТ-3; от 588 до 1470 Н при измерении по методу Роквелла, от 4900 до 14 700 Н при измерении по методу Бринелля).

Внешний вид видеоизмерительной машины представлен на рис. 2. Машина аттестована, позволяет юстировку и измерения по всем трём координатам. При проведении измерений учтены рекомендации работ [5; 6].

Примеры дефектов, полученные индентированием в изделии, выполненном из полистирола, приведены на рис. 3. Различия в дефектах, приведённых на рис.1 и 3, очевидны. Это связано с пластичностью полистирола.

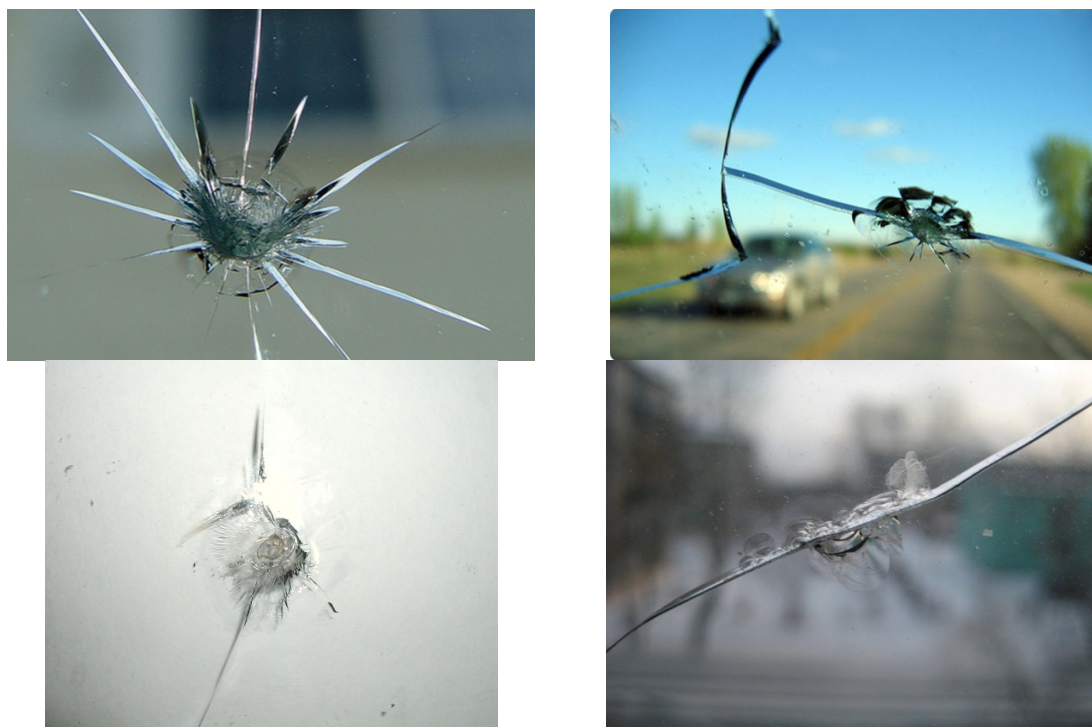


Рис. 1. Примеры форм трещин на автомобильном стекле
(фото заимствованы из Интернета)

Примеры дефектов, полученные при индентировании авиационного кварцевого стекла, приведены на рис. 4.

Схожесть дефектов, приведённых на рис. 1 и 4, очевидна, это позволяет считать условия нагружения приемлемыми.

Образцы подвергали контрастированию путём применения различных проникающих окрашивающих жидкостей, в том числе типовой пенетрант марки ЦМ-15. Применяли люминофор ЛЮМ 33 ОВ для исследования образцов в ультрафиолетовых лучах. Дефекты измеряли (длина магистральной трещины, протяжённость характерных трещин, ширина трещин, площадь и т.д.) на видеоизмерительной машине модели MicroVuSol 161. В необходимых случаях варьировали угловое положение образца по отношению к световому потоку. В результате исследования выявили, что видеоизмерительная машина модели MicroVuSol 161 пригодна для выявления и документирования дефектов указанного типа. Оставался нерешённым вопрос о допустимости детали в эксплуатацию с таким дефектом или о браковании детали (недопустимости детали с таким дефектом). Для этого эти же образцы с этими же дефектами передавали в производственные условия для аттестования или бракования деталей по используемым на производстве критериям. В результате получены параметры дефекта, позволяющие исключить деталь из эксплуатации или разрешить её эксплуатацию. Этот методологический вопрос может быть решён разработкой соответствующих технических условий или программы и методики испытаний.

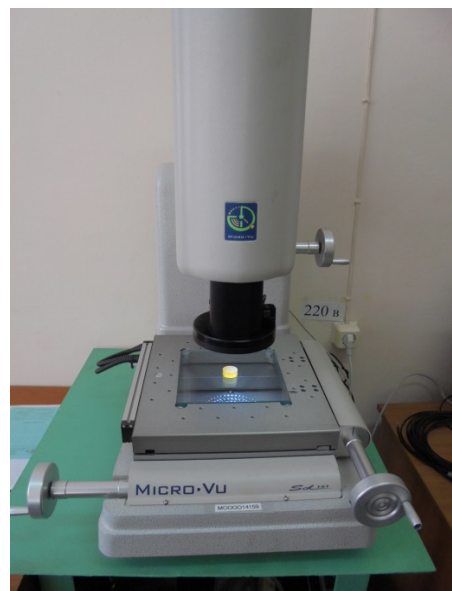


Рис. 2. Внешний вид видеоизмерительной машины (мультисенсорного центра) модели MicroVuSol 161

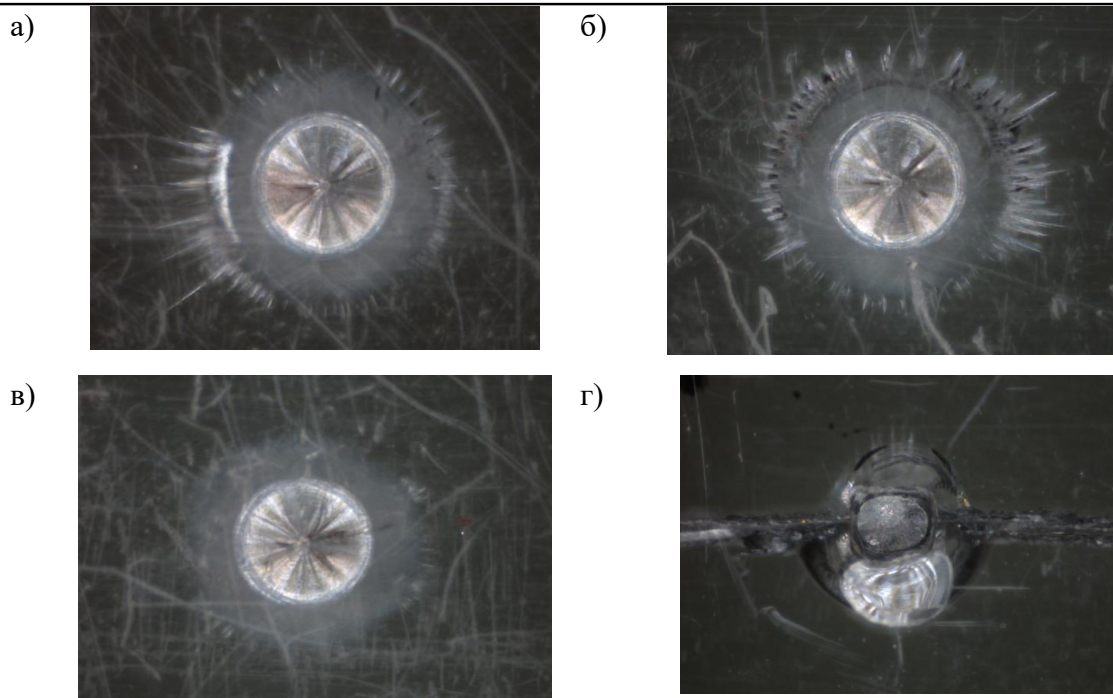


Рис. 3. Примеры дефектов, полученные в разных условиях индентирования:
а – алмазный конусный наконечник, нагрузка 1471 Н, увеличение 36 раз;
б – то же, но нагрузка 980 Н; в – то же, но нагрузка 588 Н; г – то же,
но нагрузка предельная (более 2000 Н)

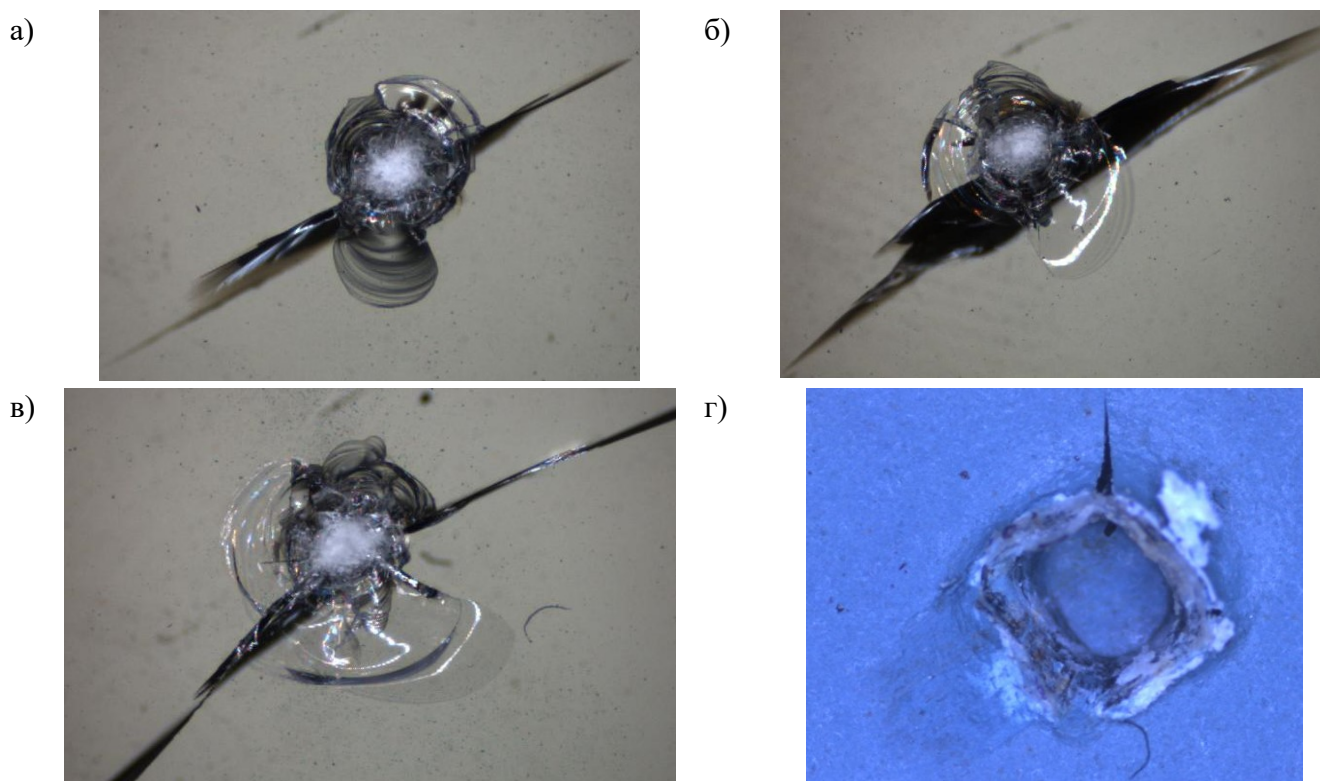


Рис. 4. Примеры дефектов, нанесённых индентированием: а, б, в – при нагружении специального кварцевого авиационного стекла (один и тот же образец, одинаковый индентор и усилие нагружения); г – те же условия нагружения образца, выполненного из приборного органического стекла

Для перепроверки вывода о возможности применения видеоизмерительной машины модели MicroVuSol 161 были проведены аналогичные исследования на находящейся в производственной эксплуатации видеоизмерительной машине модели MarVision MM 320, имеющей иные технические характеристики.

Выводы

1. Применение видеоизмерительной машины модели MicroVuSol 161 для указанной цели возможно. Необходимо совершенствование методики её применения за счёт разработки спецоснастки. В случае успешной отработки методики и спецоснастки целесообразна их адаптация для машины модели MarVision MM 320.

2. Проведённые исследования помогают решить лишь часть проблемы дефектования изделий, выполненных из материалов, имеющих низкую отражательную способность. Необходимо расширить исследования по номенклатуре материалов и видам дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солнцев, С. С. Разрушение стекла / С. С. Солнцев, Е. М. Морозов. – 2-е изд., исправ. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 149 с.
2. Солнцев, С. С. Разрушение стекла / С. С. Солнцев, Е. М. Морозов. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
3. Фрактографические методы изучения процессов разрушения ситаллов // Химия и технология стекла и ситаллов: сб. научных трудов ГИС / гл. ред. А. В. Стрекалов. – М., 1984. – С. 80-87.
4. ГОСТ Р 54494-2011. Дефекты стекла и изделий из него. – Введ. 2012-07-01. – М.: Стандартинформ, 2012. – 12 с.
5. Нейманн, Р. К. X. И. Технология мультисенсорных координатных измерений. Измерения форм, размеров и позиций в производстве и в процессе контроля качества / Р. К. X. И. Нейманн. – DieBibliothekderTechnik, 2004. – 148 с.
6. Соломахо, В. Л. Нормирование точности средств измерений, входящих в состав мультисенсорных измерительных систем / В. Л. Соломахо, Д. В. Соломахо // XV МНПК «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика»: сб. материалов. – Киев: АТМ Украины, 2015. – С. 150.

ПРИМЕЧАНИЕ

1. Сведения об исследуемых материалах приведены сжато из-за ограниченности возможности такого опубликования.



Барбашинов И. В., Сарилов М. Ю.

I. V. Barbashinov, M. Yu. Sarilov

ЗАМЕНА ВНУТРЕННИХ УСТРОЙСТВ НА ЭЛОУ-АВТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

REPLACEMENT OF INTERIOR DEVICES FOR ELOU-AVT TO INCREASE TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS

Барбашинов Иван Витальевич – магистрант кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ivan_0601@mail.ru.

Mr. Ivan V. Barbashinov – Master's degree student, Machinery and Equipment of Chemical Industry Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ivan_0601@mail.ru.

Сарилов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – D.Sc. in Engineering, Head of the Machinery and Equipment of Chemical Industry Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Аннотация. Рассмотрена возможность повышения технико-экономической эффективности установок атмосферно-вакуумной трубчатki за счет замены внутренних устройств. Представлена классификация контактных устройств с точки зрения организации взаимодействия фаз, сформулированы основные требования, которые предъявляют к контактным устройствам. Рассмотрены современные клапанные тарелки типа UFM, BDH, MVG фирмы «Зульцер Хемтех» и тарелки с фиксированными мини-клапанами VG-0 фирмы «Кох-Глитч», которые успешно эксплуатируются последние 10-15 лет во всём мире. Показаны их преимущества по сравнению с другими аналогичными обычными тарелками. Представлены критерии выбора типа контактных устройств по основным показателям. Сформулированы цели и задачи технического перевооружения, требования к конструктивному исполнению, минимальный состав проектной документации. На ООО «РН-Комсомольский НПЗ» это будет учтено при техническом перевооружении в 2018-2019 годах.

Summary. The possibility of increasing the technical and economic efficiency of atmospheric vacuum tube installations by replacing internal devices is considered. The classification of contact devices is presented from the point of view of the phase interaction organization, the basic requirements that are imposed on contact devices are formulated. Modern valve plates such as UFM, BDH, MVG from Sulzer Hemtech and plates with VG-0 fixed mini-valves from Koch-Glitch are considered, which have been successfully used for the last 10-15 years all over the world. Their advantages are shown in comparison with other similar conventional plates. The criteria for choosing the type of contact devices for the main indicators are presented. The goals and tasks of technical re-equipment, the requirements for constructive execution, and the minimum composition of design documentation are formulated. At Ltd RN-Komsomolsk oil-refinery, this will be taken into account during the technical re-equipment in 2018 and 2019.

Ключевые слова: первичная переработка, контактные устройства, эффективность.

Key words: primary processing, contact devices, the efficiency.

УДК 665.622.4.013

Введение

На нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) установки первичной переработки (ЭЛОУ-АВТ) имеют большое значение. Их работа влияет на эффективность остальных процессов переработки (крекинга, коксования, очистки и т.д.). Поэтому организации стремятся оптимизировать работу установки с целью повышения производительности при заданном значении качественных

показателей получаемых продуктов. Разделение нефти на компоненты происходит в ректификационных колоннах. На тарелках и насадках происходит контактирование жидкой и паровой фаз. От особенностей (типа, вида и конструкции) контактных массообменных устройств зависит выход продукта (качественный и количественный). Использование неправильной (нерациональной) конструкции колонны ректификации приводит к снижению качества продукции, экономической нерентабельности в процессе ректификации, что находит отражение на последующих этапах переработки нефти.

Замена внутренних устройств

Общая классификация контактных устройств с точки зрения организации взаимодействия фаз представлена на рис. 1 [1].



* - с неподвижными элементами, ** - с подвижными элементами

Рис. 1. Общая классификация контактных устройств

В колоннах ректификации применяют сотни различных конструкций контактных устройств, отличающихся по конструкции, областям применения, технико-экономическим показателям. В настоящее время применяют как эффективные клапанные и насадочные устройства, так и морально устаревшие желобчатые, провальные тарелки. К контактным устройствам предъявляются следующие требования [2]:

- широкий диапазон рабочих нагрузок по пару и жидкости;
- низкая высота, эквивалентная теоретической тарелке (ВЭТТ), для насадок и для тарелок высокий КПД;
- гидравлическое сопротивление низкое;
- барботаж равномерный на всей площади тарелки;
- работа (возможность) в загрязненных средах;
- простота конструкции, изготовления, монтажа и ремонта;
- низкая металлоёмкость.

Современные клапанные тарелки фирмы «Зульцер Хемтех» типа UFM, BDH, MVG являются новым поколением клапанных тарелок, которые успешно эксплуатируются последние 10-15 лет во всём мире. Тарелки с подвижными клапанами типа BDH (см. рис. 2) обычно используются там, где требуются большие диапазоны изменения нагрузок. Клапаны BDH имеют прямоугольную форму и ориентированы параллельно потоку жидкости для уменьшения провала вследствие закрытия края клапана со стороны набегания потока жидкости и бокового выхода пара. Благодаря

этому по сравнению с традиционными тарелками с дисковыми клапанами обеспечивается повышенная производительность и эффективность. Помимо этого, имеются следующие преимущества:

- течение жидкости легче из-за выхода паров сбоку;
- широкий предел изменения нагрузок по жидкости;
- низкая вероятность повреждения, износа клапана из-за невозможности вращения клапана и широких ножек;
- оптимальная работа тарелки при разных условиях работы;
- клапан может быть заменен с верхней стороны полотна тарелки.

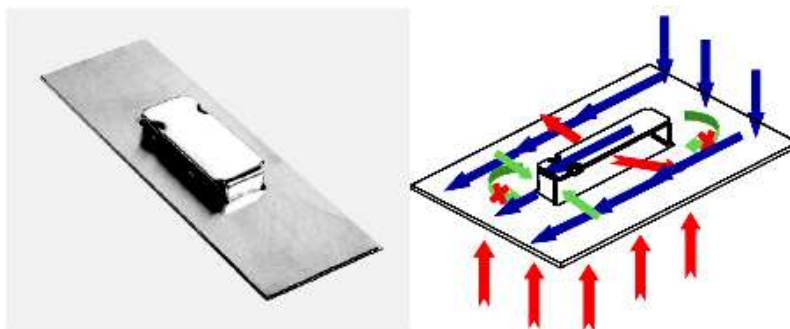


Рис. 2. Тарелки с подвижными клапанами типа BDH

Клапан ориентирован на полотне тарелки параллельно потоку жидкости. Это способствует продвижению жидкости вдоль полотна тарелки при перекрёстном токе, делает в широком диапазоне нагрузок по парам минимальный провал жидкости. Первое существенно влияет на снижение негативного эффекта продольного перемешивания жидкости вдоль оси тарелки, что особенно важно для колонн больших диаметров. Приведенные особенности направлены к поиску оптимального соотношения «эффективность-производительность» по сравнению с обычными тарелками с круглыми клапанами, что подтверждается независимыми испытаниями, проведенными исследовательской организацией Fractionation Research Inc. (FRI). Углубления на верхней пластине клапана минимизируют эффект «залипания» клапана, поддерживают высокую эффективность тарелки при уменьшенных нагрузках, а также облегчают процедуру замены клапанов.

Тарелки с неподвижными клапанами типа MVG представлены на рис. 3.

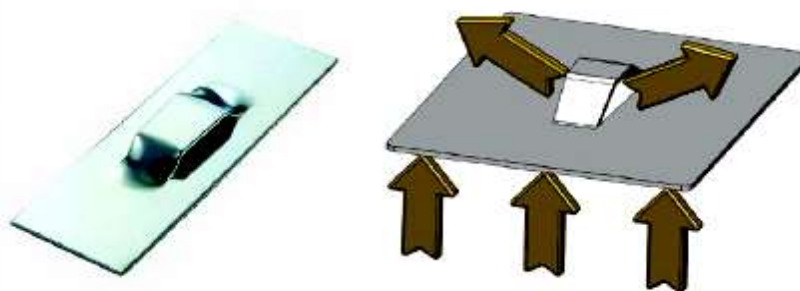


Рис. 3. Тарелки с неподвижными клапанами типа MVG

Клапаны V-Grid (фиксированные или неподвижные) – расположенные в шахматном порядке элементы, выштампованные в полотне тарелки. Клапаны имеют трапециевидную форму и ориентированы параллельно потоку жидкости. Такие клапаны обладают следующими преимуществами:

- уменьшенный унос жидкости вследствие горизонтального направления истечения через боковые отверстия пара на полотно;
- направленное движение пара на клапаны, вследствие чего уменьшена неравномерность распределения времени пребывания жидкой фазы на тарелке, при этом поток жидкости организован поперек тарелки;

- производительность выше, чем у тарелки с подвижными круглыми клапанами;
- уменьшенное гидравлическое сопротивление (в расчете на теоретическую ступень) по сравнению с тарелками, имеющими подвижные круглые клапаны;
- более широкий интервал нагрузок по сравнению с ситчатыми тарелками, но немного меньший, чем у тарелки с подвижными клапанами;
- стабильная эффективность в рабочем диапазоне нагрузок;
- более долгий срок службы по сравнению с тарелками с подвижными клапанами вследствие отсутствия движущихся частей (механический износ);
- возможность работы в загрязненных средах.

Неподвижные клапаны делают в следующих типоразмерах: SVG, MVG, MMVG. Чем меньше клапан, тем более высокая производительность из-за меньшего гидравлического сопротивления, пониженного уноса жидкости. Для переработки в загрязнённых средах используют клапаны большего размера.

На рис. 4 показаны тарелки с подвижными клапанами типа UFM.

Клапан UFM представляет собой улучшенный вариант подвижного мини-клапана, который обеспечивает максимальную гидравлическую производительность, эффективность разделения и диапазон изменения нагрузок при эксплуатации тарелок.

Зонтичная форма клапана позволяет:

- снизить инерционный момент выходящего пара;
- минимизировать унос;
- способствовать равномерному смешиванию пара и жидкости на тарелке;
- максимально увеличить зону контакта пара и жидкости на тарелке.

Две широкие ножки клапана позволяют:

- максимально увеличить надежность, препятствовать вращению, износу и отрыву клапана от тарелки;
- сделать максимальным срок использования и максимально уменьшить затраты на обслуживание.



Рис. 4. Тарелки с подвижными клапанами типа UFM

Четыре ограничителя на клапане позволяют предотвратить застревание его на тарелке и максимально повысить сопротивление загрязнению. Две различные высоты подъема позволяют максимально расширить возможности использования и диапазон изменения нагрузок при эксплуатации тарелок. Ориентация параллельно потоку жидкости позволяет максимально уменьшить гидравлический градиент вдоль потока жидкости на тарелке. Для достижения самых высоких рабочих характеристик тарелок клапан UFM может быть применен в сочетании с усовершенствованными сливными карманами.

Клапан UFM был протестирован в известном независимом испытательном центре в колонне диаметром 1,22 м, однопоточной C₆/C₇ системе при давлении 1,4 бар. Как минимум 20 % дополнительной производительности и эффективности было зафиксировано по сравнению с лучшими когда-либо тестируемыми высокопроизводительными тарелками с усеченными сливными карманами.

Тарелки с фиксированными мини-клапанами VG-0 (см. рис. 5) фирмы «Кох-Глитч» хорошо зарекомендовали себя благодаря ряду преимуществ по сравнению с обычными подвижными кла-

панями. Они работают дольше обычных клапанов, т.к. не подвержены механическому износу ввиду отсутствия движения клапанов, истирающего металл, не забиваются, не заклинивают, не выбиваются. Их производительность выше тарелок с подвижными клапанами типа А или Т. Использование таких клапанов позволяет в случае необходимости легко очистить тарелки в период остановки колонны на ремонт.

Тарелки SUPERFRAC™ с неподвижными клапанами VG-0 (см. рис. 6) – поперечноточные тарелки с повышенными рабочими характеристиками, имеют наивысший общий показатель производительности и эффективности из всех поперечноточных тарелок, испытанных FRI. Сочетание патентованных технологий, использованных при создании этих тарелок, позволило обеспечить высокую производительность и максимальный парожидкостной контакт.



Рис. 5. Полотно тарелки с клапанами VG-0



Рис. 6. Тарелки SUPERFRAC™ с неподвижными клапанами VG-0

Выбор типа контактных устройств весьма сложен, обычно используют критерии и показатели, направленные на увеличение производительности и коэффициента полезного действия, снижения гидравлического сопротивления и др.

Конструкций контактных устройств, являющихся универсальными, эффективно работающими в разных средах, не существует. При выборе тарелок и насадок из предложенных на рынке следует отдать предпочтение той конструкции, основные показатели эффективности которой в наибольшей мере удовлетворяют характеристикам и критериям, предъявляемым к проекту.

Колонная аппаратура является сердцевиной нефтепереработки, и от того, как работает оборудование, зависят энергозатраты, качество и отбор продукции. На многих заводах требуется обновление контактных устройств из-за долгой эксплуатации. Если задачи при проектировании могут выполняться закладкой сразу современного оборудования, то при замене внутренних устройств (реконструкции) требуется рассмотрение различных эффективных и конкретных решений.

Ректификационное оборудование с истечением определенного времени может физически устареть либо перестать отвечать требованиям по качеству получаемых продуктов или обеспечению требуемой производительности, поскольку с течением времени меняется архитектура завода, сырье, а следовательно, и решаемые задачи. Техническое перевооружение по замене внутренних устройств включает:

- выполнение проектной работы с целью определения оптимального варианта изменения атмосферной колонны и вакуумной колонны;
- изготовление и поставку внутренних контактных устройств (тарелок, постоянной насадки) и других конструктивных элементов колонн и элементов трубопроводов;
- демонтаж старых и монтаж новых внутренних устройств и конструктивных элементов колонн и трубопроводов;
- пусконаладочные работы.

Конструктивное и материальное исполнение аппарата – согласно Технического регламента Таможенного союза № 032/2013 «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением»: среда – взрывоопасная, пожароопасная, токсичная, коррозионная; скорость коррозии металла тарелки – до 0,1 мм/год; материальное исполнение для тарелки с неподвижными клапанами

ми – сталь коррозионно-стойкая жаропрочная; материальное исполнение для тарелки с подвижными клапанами – сталь коррозионно-стойкая жаропрочная; материальное исполнение штуцеров и трубопровода ввода сырья в атмосферную колонну – сталь 20.

В состав проектной работы входят:

1. модели технологических схем атмосферного и вакуумного блоков установки (атмосферной ректификационной колонны, вакуумной колонны, при которых достигается требуемое качество вырабатываемой продукции);

2. расчет материального баланса с определением интервала значений загрузки колонн, определяющих их эксплуатацию с выпуском компонентов нефтепродуктов с заявленными показателями качества;

3. рекомендации по изменению технологического режима работы колонн или установки в целом. При моделировании и выдаче рекомендаций необходимо: рассмотреть возможность технического перевооружения колонн путём замены контактных устройств без замены какого-либо технологического оборудования, входящего в состав атмосферного и вакуумного блока установки; в максимальной степени использовать существующие штуцера и конструктивные элементы колонн; в случае невозможности обеспечения качества включить в состав проекта расчёт необходимого нового оборудования; при необходимости рассмотреть возможное изменение наружной обвязки (АВО, ЦО и т.д.), изменение диаметра штуцеров и т.д.

Основанием для замены в атмосферной колонне внутренних устройств может служить увеличение выработки дизельной фракции за счет снижения содержания фракций, выкипающих до 360 °С; для вакуумной колонны – уменьшение содержания «светлых» фракций в вакуумном газойле от существующих показателей за счёт увеличения отбора вакуумного дизельного топлива (компонента ТСМ-1).

Вывод

За последние 30 лет произошел существенный скачок в способах усовершенствования конструкции тарелок. Универсальных конструкций контактных устройств, эффективно работающих на всех средах, не может быть. Для принятия решения о выборе конкретного типа тарелок следует ориентироваться на основные показатели эффективности, предъявляемые к данному проекту. В настоящее время для повышения технико-экономических показателей повсеместно происходит замена контактных устройств на более совершенные, в ООО «РН-Комсомольский НПЗ» данная замена запланирована на 2018-2019 годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заботин, Л. И. Химия и технология вторичных процессов переработки нефти: учеб. пособие / Л. И. Заботин. – Самара: СамГТУ, 2014. – 332 с.
2. Химическая технология нефти и газа. Конспект лекций: учеб. пособие / сост. Е. Н. Ивашкина, Е. М. Юрьев, А. А. Салищева. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2014. – 158 с.
3. Процессы переработки органических соединений природного происхождения: учеб. пособие / А. И. Леонтьева [и др.]. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2016. – 84 с.
4. Савченков, А. Л. Первичная переработка нефти и газа: учеб. пособие / А. Л. Савченков. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. – 128 с.
5. Чуракова, С. К. Разработка энергосберегающих технологий в нефтегазопереработке на основе перекрестноточных насадочных контактных устройств: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.07 / Чуракова Светлана Константиновна. – Уфа, 2014. – 560 с.



Олещук В. А., Шарипов Ш. Ш.
V. A. Oleshchuk, S. S. Sharipov

ОБЪЕМ НЕЗАВЕРШЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ, ПРИНЯТОЙ НА ПРЕДПРИЯТИИ

VOLUME OF UNFINISHED PRODUCTION AS INDICATOR EFFICIENCY OF THE PLANNING SYSTEM ADOPTED AT ENTERPRISE

Олещук Валентина Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: tm@knastu.ru.

Mrs. Valentina A. Oleshchuk – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: tm@knastu.ru.

Шарипов Шариф Шириншоевич – магистр направления 27.04.01 «Стандартизация и метрология» кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Sharif S. Sharipov – Master's Degree student, major in standardization and metrology, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Объем незавершенного производства является наиболее объективным показателем эффективности принятой на предприятии системы планирования производственного процесса. Описывается традиционная система планирования производственного процесса, которая гарантированно приводит к росту незавершенного производства. Одним из путей снижения объема незавершенного производства является методика планирования «точно в срок». Описываются преимущества производства по принципу «точно в срок».

Summary. The volume of unfinished production is the most objective indicator of the effectiveness of the production planning system adopted at the enterprise. A traditional system for planning the production process is described, which leads to an increase in work. One of the ways to reduce the amount of unfinished work is the «just-in-time» planning method. The advantages of production on a «just-in-time» basis are described.

Ключевые слова: система планирования, традиционная система планирования, потери, планирование «точно в срок», производительность, незавершенное производство, конкурентные преимущества.

Key words: planning system, traditional planning system, losses, «just-in-time» planning, productivity, work in progress, competitive advantages.

УДК658.77

Производство авиационной техники является самым высокотехнологичным направлением развития российской авиационной промышленности. Жесткая конкуренция на международном авиационном рынке ставит сегодня перед отечественными предприятиями авиастроения серьезные проблемы. К их числу относятся: проблема повышения качества процессов производства, своевременного выполнения заказов, необходимость снижения затрат на производство изделия.

Многие российские предприятия, приобретая новейшие станки и технологии, продолжают управлять производством по-старому. В соответствии с традиционной системой планирования производственные программы разрабатываются и выдаются плановыми службами завода цехам и производственным участкам на очередной год с квартальной и месячной разбивкой. Каждая единица оборудования в соответствии с плановым заданием загружается по максимуму. Режимы резания назначаются исходя из максимально возможной производительности. Мастер сам планирует работу участка, определяет загрузку оборудования.

Весь производственный процесс разбит на отдельные этапы, каждый из которых выполняется в специализированных цехах (получение заготовок, обработка резанием, термообработка, узловая и окончательная сборка). В соответствии с традиционной системой организации производственного процесса каждый этап производит столько продукции, сколько может вне зависимости от потребностей следующего этапа. В итоге происходит перепроизводство продукции на каждом этапе производственного процесса.

Чем больше размер партии запуска, тем большее время необходимо для обработки данной партии на той или иной технологической операции. Межоперационные пролёживания, вызванные неэффективной передачей деталей со станка на станок, с одного участка на другой, из цеха в цех, составляют 90 % длительности производственного цикла. Если цеха выпускают свою продукцию партиями и передают её в другие цеха для завершения производственного цикла тоже партиями, то задержки с завершением работы вам гарантированы. Это приводит к росту объема незавершенного производства, т.е. продукции, находящейся в стадии незаконченного техпроцесса и не прошедшей всех ступеней производства, комплектации и приемки.

Для адекватной оценки себестоимости готовой продукции важно правильно рассчитать объем «незавершенки». Если объем незавершенного производства превышает некоторое пороговое значение, то это приводит к ситуации, когда производство уже не может быть устойчивым и рентабельным в принципе. Вся продукция, произведенная на разных стадиях производственного процесса, но не реализованная заказчику, т.е. незавершенное производство, находится на балансе предприятия. Таким образом, объем незавершенного производства напрямую влияет на себестоимость готовой продукции, а следовательно, и на конкурентные преимущества изделия. Чем больше объем незавершенного производства, тем больше объемы финансовых ресурсов, «замороженных» в запасах.

В условиях перехода от централизованной плановой экономики к рыночным отношениям существенно меняются подходы к планированию работы предприятия в целом, его структурных подразделений. Применение отечественными предприятиями авиастроения традиционных методов управления производственным процессом в современных условиях не эффективно и даже в значительной степени снижает их конкурентоспособность. Для достижения постоянного роста прибыли и производительности авиастроительные компании применяют эффективные методы управления производством. Опыт зарубежных авиастроительных гигантов показывает, что увеличение производительности на порядок основано не только на новых технических возможностях.

В последние годы разработан ряд новых подходов к управлению производственным процессом. Наиболее прогрессивными из них по праву считаются «Бережливое производство». Ключевым моментом такого подхода к управлению производственным процессом является система планирования «точно в срок» (Just in Time или JIT). Предприятия, работающие в системе «точно-в-срок» имеют существенное преимущество перед конкурентами, которые используют традиционный подход. У них ниже затраты на производство, меньше брака, выше мобильность производственного процесса, они оперативно реагируют на изменение запросов потребителя.

«Точно в срок» – современная концепция управления производством, которая направлена на снижение количества запасов и в первую очередь на уменьшение объема незавершенного производства. Необходимые комплектующие и материалы поступают в нужном количестве в нужное место и в нужное время. В соответствии с концепцией «точно в срок» каждая последующая операция технологического процесса начинается в тот момент, когда она к этому готова. Все производственные подразделения (цеха, участки) работают не в соответствии с жесткими месячными планами, продукция запускается в производство по запросам цеха, следующего по производственному процессу.

Основные преимущества управления производственным процессом по такой методике: максимальное сокращение длительности производственного цикла и объема незавершенного производства, гибкость, повышение производительности и эффективности использования оборудования, высокое качество изделий на всех этапах технологического процесса, снижение объема брака



и переработок. «Точно срочные» системы требуют очень небольших материальных запасов, поскольку последовательные операции жестко скоординированы.

Согласно философии ЛТ, хранение запасов – бессмысленные расходы. Системы «точно в срок» созданы для сведения к минимуму материальных запасов производства. С помощью подхода ЛТ постепенно понижают уровень запасов. Внедрение таких систем в производственный процесс требует жестко скоординированных последовательных операций всех этапов технологического процесса начиная с механической обработки и заканчивая сборкой.

Целью системы «точно в срок» является производство такого количества продукции, которое необходимо потребителю.

Для успеха внедрения системы управления производством «точно в срок» необходимо добиться промежуточных целей. К некоторым из них можно отнести:

- отдельное планирование закупок по серийным номерам изделия. Устойчивость работы предприятия имеет сильную зависимость от работы поставщиков, которые находятся вне зоны управления предприятием. Необходимо разработать механизмы взаимодействия с поставщиками, их заинтересованность в своевременности поставок комплектующих. При этом должна использоваться методология минимизации страховых запасов. Размеры закупок не должны приводить к увеличению незавершенного производства. Материалы и комплектующие изделия должны поступать на предприятие непосредственно перед их запуском в производство, на механическую обработку, сборку и т.д.;

- сокращение длительности производственного цикла. Технология механической обработки должна содержать минимальное количество операций. Для этого необходимо оптимизировать технологические процессы за счет использования многоцелевых станков. Обработка по максимуму на одном станке позволит значительно сократить межоперационные прослеживания и, как следствие, снизить объем незавершенного производства;

- снижение времени установочных операций. Целью является установка деталей для обработки «в одно касание». Этого можно достичь за счет оптимизации планирования производственного процесса и времени технологической подготовки производства, внедрения выполняемых производственных операций или формы обрабатываемых деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бункин, В. А. Решение задач оптимизации в управлении машиностроительным производством / В. А. Бункин, Б. Я. Курицкий. – М.: Машиностроение, 2006. – 232 с.
2. Порядок планирования производства, оперативного учета движения деталей узлов, агрегатов и отчетности в агрегатно-сборочных цехах. Инструкция. ОАО «КнААПО им. Ю. А. Гагарина». 2011.
3. Порядок планирования, учета и отчетности производственной деятельности в цехах механообрабатывающего и штампозаготовительного производства. Инструкция. ОАО «КнААПО им. Ю. А. Гагарина». 2011.
4. Питеркин, С. В. Точно вовремя для России. Практика применения ERP-систем / С. В. Питеркин, Н. А. Оладов, Д. В. Исаев. – М.: Альпина Паблишер, 2006. – 368 с.
5. Попеско, И. Общая эффективность оборудования / И. Попеско. – М.: Институт стратегических исследований, 2007. – 120 с.
6. Попеско, И. Производство без потерь для рабочих / И. Попеско. – М.: Институт стратегических исследований, 2008. – 160 с.
7. Совершенствование производственных процессов: принципы управления [Электронный ресурс] / Теория и практика управленческого учета. – Режим доступа: <http://www.gaap.ru/biblio/management/strategic/009.asp>.

Афони́на И. И., Сарило́в М. Ю.

I. I. Afonina, M. Yu. Sarilov

МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА

MODERNIZATION OF THE CATALYTIC RIFORMING INSTALLATION TO INCREASE THE QUALITY OF HYDROGEN CONTAINING GAS

Афони́на Ирина Игоревна – магистр кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: irishka1995.10@mail.ru.

Mrs. Irina I. Afonina – Master's Degree Student, Machinery and Equipment of Chemical Industry Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: irishka1995.10@mail.ru.

Сари́лов Михаи́л Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – Doctor of Engineering, Professor, Machinery and Equipment of Chemical Industry Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Аннотация. В статье представлен метод модернизации установки каталитического риформинга с блоком предварительной гидроочистки дизельного топлива для повышения качества водородосодержащего газа. Повышение концентрации водорода в циркулирующем газе необходимо для увеличения качества изомеризата и гидрогенизата. Модернизация установки позволит увеличить межремонтный пробег установки за счет увеличения срока службы катализатора на 2-4 %. Также в статье приведен сравнительный анализ методов очистки циркулирующего газа, используемых на нефтеперерабатывающих предприятиях России. Результаты данного анализа доказали преимущество абсорбционного метода очистки водородосодержащего газа от углеводородсодержащего газа над остальными. Разработка данного метода модернизации установки каталитического риформинга обусловлена повышенными темпами развития нефтехимической промышленности, установленными на законодательном уровне.

Summary. The paper presents a method for upgrading a catalytic reforming installation with a diesel pre-hydro treatment unit to improve the quality of a hydrogen-containing gas. An increase in the concentration of hydrogen in the circulating gas is necessary to increase the quality of Isomerate and Hydrogenate. Besides, the modernization of the installation will increase the overhaul mileage of the installation due to an increase in the service life of the catalyst by 2-4 %. The article also provides a comparative analysis of the methods for cleaning circulating gas used in Russian oil refineries. The results of this analysis proved the advantage of an absorption method for purifying a hydrogen-containing gas from a hydrocarbon-containing gas above the others. The development of this method of modernization of the catalytic reformer is conditioned by the increased rates of the petrochemical industry development, established at the legislative level.

Ключевые слова: водородосодержащий газ, абсорбция, адсорбция, установка каталитического риформинга, углеводородсодержащий газ, повышение концентрации.

Key words: hydrogen-containing gas, absorption, adsorption, catalytic reforming installation, hydrocarbon-containing gas.

УДК 66.02

Введение

Согласно утвержденной в 2014 г. государственной программе «Стратегия развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 г.» [3] и утвержденному в 2012 г. «Плану развития газо- и нефтехимии России на период до 2030 г.» [4] в период с 2012-2030 гг. прогнозируется рост производства и мощностей нефтеперерабатывающих предприятий России в 4...5 раз (см. рис. 1).

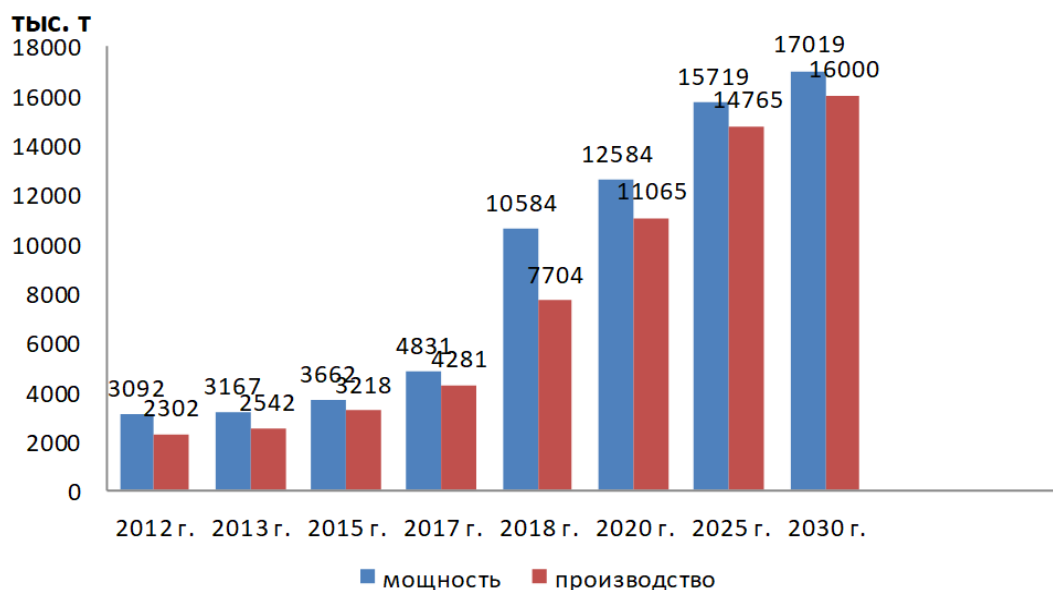


Рис. 1. График прогнозирования роста производства и мощностей нефтеперерабатывающих предприятий

На данном графике видно, что в течение 13 лет (2017-2030 гг.) производство должно вырасти в 3,7 раз, а мощности – в 3,2 раза.

В мае 2017 г. на заводах России, перерабатывающих нефтяное сырье (НПЗ, ГПЗ «Газпрома» и мини-НПЗ), среднесуточная выработка нефтепродуктов составила 467,3 тыс. т в сутки, что превышает ожидаемые прогнозы. Данная информация была опубликована в научном журнале «ТЭК России» в июне 2017 г. [1].

Основной прирост мощностей и производительности на нефтеперерабатывающих предприятиях происходит за счет постройки новых установок, предназначенных для более глубокой переработки нефти. Таковыми являются гидрокрекинг, установка каталитического риформинга с блоком гидроочистки дизельного топлива. Для этих установок очень важно производить водородосодержащий газ (ВСГ) в достаточном объеме и надлежащего качества.

Основным источником получения ВСГ является установка каталитического риформинга с блоком предварительной гидроочистки. ВСГ циркулирует по всей установке, которая включает в себя три реактора. После окончания цикла ВСГ необходимо очистить от углеводородных соединений, которые способствуют скорейшей закоксовываемости реакторов блока риформинга и гидроочистки. Очистка ВСГ позволяет увеличить срок эксплуатации катализатора, тем самым сократить расходы завода.

В связи с изложенным разработка экономически и экологически приемлемой технологии очистки ВСГ от примеси углеводородного газа (УВГ) представляется, несомненно, актуальной.

Существующая на большинстве заводов технология очистки ВСГ от УВГ не обеспечивает необходимый процент содержания водорода в ВСГ (не менее 90 %).

Целью работы является повышение эффективности существующей типовой технологической схемы очистки ВСГ от УВГ на блоке каталитического риформинга за счет включения в нее блока абсорбционной очистки ВСГ от УВГ.

Сравнительный анализ методов очистки водородосодержащего газа

Существуют три основных метода очистки ВСГ от примесей:

1. абсорбционный, предназначенный для извлечения из потока газа углеводородов жидким поглотителем (стабильный катализат);
2. адсорбционный, предназначенный для извлечения из потока газа углеводородов твердым поглотителем (активированные угли, полимеры);
3. сепарация.

При адсорбции извлечение углеводородов из циркулирующего газа происходит за счет их поглощения пористыми адсорбентами. Адсорбент удерживает на поверхности удаляемый компонент, а из адсорбера выходит очищенный водород при давлении, близком к давлению поступающего на очистку газа.

Преимуществом адсорбционных методов является высокая поглотительная способность адсорбентов, что позволяет обрабатывать относительно малым количеством сорбента огромные объемы газов и достигать при этом высокой степени очистки. Недостатки адсорбционных методов заключаются в периодичности процесса очистки, высокой стоимости регенерации адсорбентов и сравнительно низкой эффективности аппаратуры. Организация непрерывных процессов связана с конструктивными и технологическими трудностями.

Большинство нефтеперерабатывающих заводов для очистки ВСГ использует адсорбционные установки. В качестве адсорбента зачастую используют активированный уголь и полимерные адсорбенты.

Использование активированных углей в качестве адсорбента нашло широкое применение в процессах адсорбции органических соединений. Однако процесс адсорбции на активированном угле сопровождается выделением тепла, что может привести к возгоранию адсорбента и повышению уровня требований к пожарной безопасности проводимых процессов адсорбции. Кроме того, в адсорбенте с течением времени накапливаются нежелательные примеси, приводящие к частичной потере адсорбционных способностей поглотителя.

При анализе технологических схем установок каталитического риформинга нефтеперерабатывающих заводов было выявлено, что для очистки ВСГ от примесей многие заводы используют адсорбенты AP-025 и MOA-98.

При этом концентрация H_2 в ВСГ не зависит от качества данного адсорбента, что отражается в табл. 1 и 2. Концентрация водорода обратно пропорциональна количеству содержащихся углеводородов, которые в смеси находятся в избытке.

Таблица 1

Характеристика водородосодержащего газа до входа в адсорберы (AP-025 и MOA-098)

| Показатели | Единицы измерения | Свежий ВСГ |
|------------------------|--------------------|------------------|
| 1. Количество | нм ³ /ч | 82 000...190 000 |
| 2. Плотность при 15 °С | кг/м ³ | 0,2...0,3 |
| 3. H_2 | % об | 75...90 |
| 4. C_1 | % об | 3,32...5,48 |
| 5. C_2 | % об | 2,07...4,76 |
| 6. C_3 | % об | 2,09...3,41 |
| 7. i- C_4 | % об | 0,41...0,72 |
| 8. n- C_4 | % об | 0,46...0,68 |
| 9. C_5 и выше | % об | 0...1,9 |
| Примеси: | | |
| H_2S | ppv, об | до 10 |
| H_2O | ppm, масс | до 1000 |
| HCl | ppv, об | до 5 |

Согласно информации, полученной с сайта закупок «Роснефть», стоимость 29 м³ адсорбента AP-025 составляет 5 186 700,00 р. Замена данного адсорбента требуется каждые 5...6 лет, также как и MOA-98. Помимо закупки адсорбента, заключаются договоры на вывоз и захоронение адсорбента.

Нередко для очистки ВСГ от УВГ используют сепараторы высокого давления. В процессе сепарации происходит разделение твердой, жидкой и газовой фаз потока с последующим извлечением из него твердой и жидкой фаз: благодаря воздействию сил тяжести или инерционных (центробежных) сил, возникающих при криволинейном движении потока на малых скоростях, происходит выпадение частиц.

Таблица 2

Характеристика водородосодержащего газа на выходе из адсорберов

| Показатели | Единицы измерения | Свежий ВСГ |
|--------------------------|--------------------|------------------|
| 1. Количество | нм ³ /ч | 82 000...190 000 |
| 2. Плотность при 15 °С | кг/м ³ | 0,2...0,3 |
| 3. Н ₂ | % об | 75...90 |
| 4. С ₁ | % об | 3,32...5,48 |
| 5. С ₂ | % об | 2,07...4,76 |
| 6. С ₃ | % об | 2,09...3,41 |
| 7. i-С ₄ | % об | 0,41...0,72 |
| 8. n-С ₄ | % об | 0,46...0,68 |
| 9. С ₅ и выше | % об | 0...1,9 |
| Примеси: | | |
| Н ₂ S | ppv, об | отс |
| Н ₂ O | ppm, масс | отс |
| HCl | ppv, об | отс |

Основными недостатками данного метода являются: низкая степень извлечения водородосодержащего газа от углеводородов, высокие потери компонентов.

Метод абсорбции заключается в извлечении газообразных углеводородов из водородной смеси жидким абсорбентом при давлении 4...5 МПа и температуре -10...+20 °С; в качестве абсорбента используется стабильный катализат риформинга (бензин).

Абсорбционные методы характеризуются непрерывностью и универсальностью процесса, экономичностью и возможностью извлечения больших количеств примесей из газов. Протivotочная абсорбция обеспечивает большую конечную концентрацию поглощаемого газа в абсорбенте, а вместе с этим и меньший расход абсорбента.

Широкий ассортимент насадочных элементов позволяет подобрать наиболее подходящие габаритные размеры колонн. С применением перекрестноточной абсорбции габаритные размеры колонны уменьшаются в разы, а конечная концентрация водорода в ВСГ увеличивается.

Абсорбция имеет множество преимуществ перед методом адсорбции и сепарации:

- использование из всех внешних ресурсов только электроэнергии;
- отсутствие потребности в дополнительных дорогостоящих веществах, т.к. в качестве абсорбента применяется стабильный катализат (бензиновая фракция) установки;
- высокая степень очистки ВСГ от УВГ, за счет чего увеличивается межремонтный пробег катализатора реакторов.

Средняя стоимость абсорбера с насадкой составляет 2 500 000,00 р., что практически в 2 раза меньше стоимости адсорбера, способного отчистить ВСГ от углеводородов (этан, метан).

С увеличением концентрации водорода в ВСГ увеличивается глубина очистки бензиновых фракций и уменьшается закоксовываемость катализатора, что является дополнительной экономической выгодой при установке абсорбера (см. табл. 3).

Описание модернизации технологического процесса

Рассмотрим стандартную технологическую схему установки каталитического риформинга с блоком гидроочистки дизельного топлива (см. рис. 2).

Весь процесс начинается с блока гидроочистки.

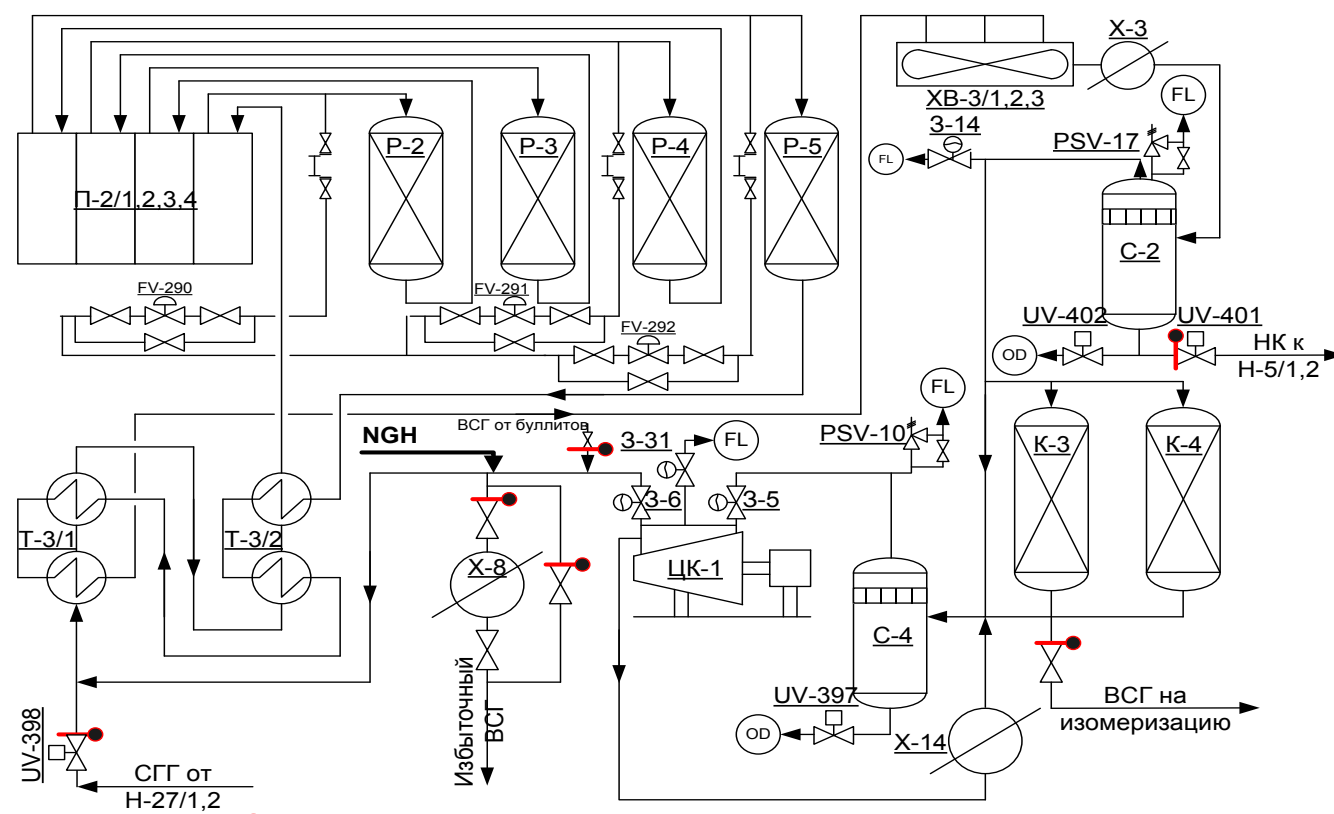
Из тройника смешения газосырьевая смесь поступает в межтрубное пространство теплообменников Т-3/1,2. Газосырьевая смесь с температурой 190...260 °С поступает в конвекционную зону печи, разделяется на 2 потока и нагревается за счет тепла дымовых газов. Пройдя радиантную зону, два потока объединяются в один и по трансферному трубопроводу направляются в реактор гидроочистки Р-5. Газопродуктовая смесь после реактора гидроочистки проходит трубное пространство теплообменников Т-3/2, Т-3/1, нагревая исходную газосырьевую смесь. Затем охла-

ждается в аппаратах воздушного охлаждения ХВ-1/1,2,3, доохлаждается в водяном холодильнике Х-3 и поступает в виде газожидкостной смеси в сепаратор гидроочистки С-2.

Таблица 3

Итоги сравнительного анализа

| Адсорбция | | Абсорбция | | Сепарация | |
|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------|---------------------|-------------------------------|
| Плюсы | Минусы | Плюсы | Минусы | Плюсы | Минусы |
| Концентрация $H_2 = 99,9\%$ об. | Цикличность процесса | Концентрация $H_2 = 95\%$ об. | | Непрерывный процесс | Концентрация $H_2 = 75\%$ об. |
| | Высокая стоимость адсорбента | Непрерывный процесс | | | |
| | Необходимость утилизации адсорбента | Экономичность | | | |



↑ - места установки заглушек

Рис. 2. Типовая схема установки каталитического риформинга с блоком предварительной гидроочистки

В сепараторе С-2 происходит разделение ВСГ и нестабильного гидрогенизата, отстой воды.

ВСГ из сепаратора С-2 возвращается на прием циркуляционного компрессора ЦК-1 через адсорбционные колонны К-3,4, оснащенные адсорбентами AP-025 и MOA-98, и сепаратор С-4.

Таким образом, мы видим, что основная очистка ВСГ проходит на блоке гидроочистки. При этом ни на одном из этапов этой очистки ВСГ не подвергается очистке от УВГ намеренно. Извлечение легких углеводородов является побочным эффектом.

После модернизации установки (включение абсорбционной колонны К-5 на блоке каталитического риформинга) схема будет выглядеть следующим образом (см. рис. 3).

ВСГ поступает в сепаратор С-4 для осушки газа. Далее осушенный газ поступает на центробежный компрессор ЦК-1. После компрессора часть ВСГ с давлением не более 2,25 МПа направляется в узел смешения с гидрогенизатом.

Избыток газа направляется на охлаждение до 20 °С в водяной холодильник Х-18. Далее 50 % потока направляется на очистку в абсорбционную колонну К-5, после, смешиваясь с циркулирующим потоком, направляется в узел смешения. Абсорбент (стабильный катализат) отбирается с блока стабилизации. На выходе из колонны К-5 катализат направляется на подачу в насос Н-5.

Заключение

Совершенствование технологической схемы установки каталитического риформинга необходимо, так как это поможет повысить октановое число товарных бензинов.

При проведении сравнительного анализа было выявлено, что экономически оправданным является метод абсорбционной очистки ВСГ от УВГ, позволяющий достигнуть высокой концентрации водорода и использующий в качестве абсорбента стабильный катализат установки.

Проведенный литературный обзор показал, что потери риформирования при использовании неочищенного ВСГ составляют 16...19 %. [2]. Опыты профессора Г. Н. Маслянского показывают: при снижении УВГ в ВСГ до 5 % потери при процессе риформирования снижаются до 4...5 %.

Включение абсорбционной колонны в технологическую схему позволяет достигнуть концентрации H_2 не менее 95 %. За счет уменьшения углеводородов в ВСГ уменьшается коксоотложение на катализаторе. Следовательно, увеличивается межремонтный пробег реакторов. Кроме того, увеличивается качество бензинов, а также увеличивается процент переработки нефтепродуктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Итоги производственной деятельности отраслей ТЭК в январе-мае 2017 года // ТЭК России. – 2017. – № 6.
2. Маслянский, Г. Н. Каталитический риформинг бензинов / Г. Н. Маслянский. – СПб.: Химия, 1978. – 221 с.
3. Об утверждении стратегии развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 г.: приказ Минпромторга России № 651, Минэнерго России от 08 апр. 2014 г. № 172 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/420245722>.
4. О плане развития газо- и нефтехимии России на период до 2030 года: приказ Минэнерго России от 01 марта 2012 г. № 79 (с изм. от 06.12.2016) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/499072050>.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
METALLURGY AND MATERIALS

Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одинокое В. И., Свиридов А. В., Петров В. В.
A. I. Yevstigneev, E. A. Dmitriev, V. I. Odinokov, A. V. Sviridov, V. V. Petrov

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧ
ПО МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ
В ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ**

**TECHNOLOGICAL PREREQUISITES FOR THE PROBLEM STATEMENT
ON MATHEMATICAL MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF SHELL MOLD
IN INVESTMENT CASTING**

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, советник при ректорате, профессор кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: diss@knastu.ru.

Mr. Alexei I. Yevstigneev – Doctor of Engineering, Professor, Rectorate’s adviser, Mechanical Engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: diss@knastu.ru.

Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rector@knastu.ru.

Mr. Eduard A. Dmitriev – Doctor of Engineering, Professor, Rector, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: rector@knastu.ru.

Одинокое Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор-консультант кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: 79122718858@yandex.ru.

Mr. Valerii I. Odinokov – Doctor of Engineering, Professor, Visiting professor, Mechanical Engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: 79122718858@yandex.ru.

Свиридов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: diss@knastu.ru.

Mr. Andrei V. Sviridov – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: diss@knastu.ru.

Петров Виктор Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология переработки нефти и полимеров» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: petrovpng@mail.ru.

Mr. Victor V. Petrov – Doctor of Engineering, Professor, Technology of Oil and Polymer Processing Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: petrovpng@mail.ru.

Аннотация. В статье подведены некоторые итоги и обобщены результаты многолетних исследований математического моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочковых форм (ОФ) в процессе их формообразования и эксплуатации с учетом их структурно-морфологического строения и видов гидромеханических и температурных воздействий на них. Исследованы НДС монослойных, многослойных, в том числе пористых ОФ при их сушке, выплавлении моделей, прокаливании, заливке жидким металлом в опорном наполнителе и истинно оболочковых форм и затвердевании отливок. Теоретически спрогнозировано трещинообразование в ОФ на различных этапах их формообразования и эксплуатации.

Summary. In the article, the results of long-term studies of mathematical modeling of the stress-strain state (SSS) of shell molds (SM) in the process of their formation and operation, taking into account their structural and morphological structure and the types of hydromechanical and thermal effects on them, are summarized. The authors cover the SSS of monolayered and multilayered shell molds, including porous SMs when drying them, model melting, calcination, pouring liquid metal into both the supporting filler and the truly shell molds and solidifying the

castings. The formation of cracks in the SM, at various stages of their formation and operation is theoretically predicted.

Ключевые слова: оболочковая форма, математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние.

Key words: shell mold, mathematical modeling, stress-strain state.

УДК 621.71.04

Введение. Метод литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) является одним из прогрессивных методов получения конструктивно сложных, максимально приближенных к готовым изделиям отливок [1].

Качество оболочковых форм (ОФ) и отливок в ЛВМ формируется на всех технологических этапах их изготовления и применения. Наиболее распространенным способом изготовления ОФ является технология послойного нанесения огнеупорного покрытия на выплавляемую модель [1; 2]. Также известна и используется технология формирования однослойных (монослойных) оболочек путем осаждения огнеупорного материала из суспензии на выплавляемую модель методом электрофореза [3].

Схематично структуры таких ОФ представлены на рис. 1, где а – двухслойная электрофоретическая оболочка без явных границ раздела двух слоев, б – многослойная (на примере от 5 до n слоев) оболочка с явными границами раздела между слоями, а на рис. 2 – виды их изломов.

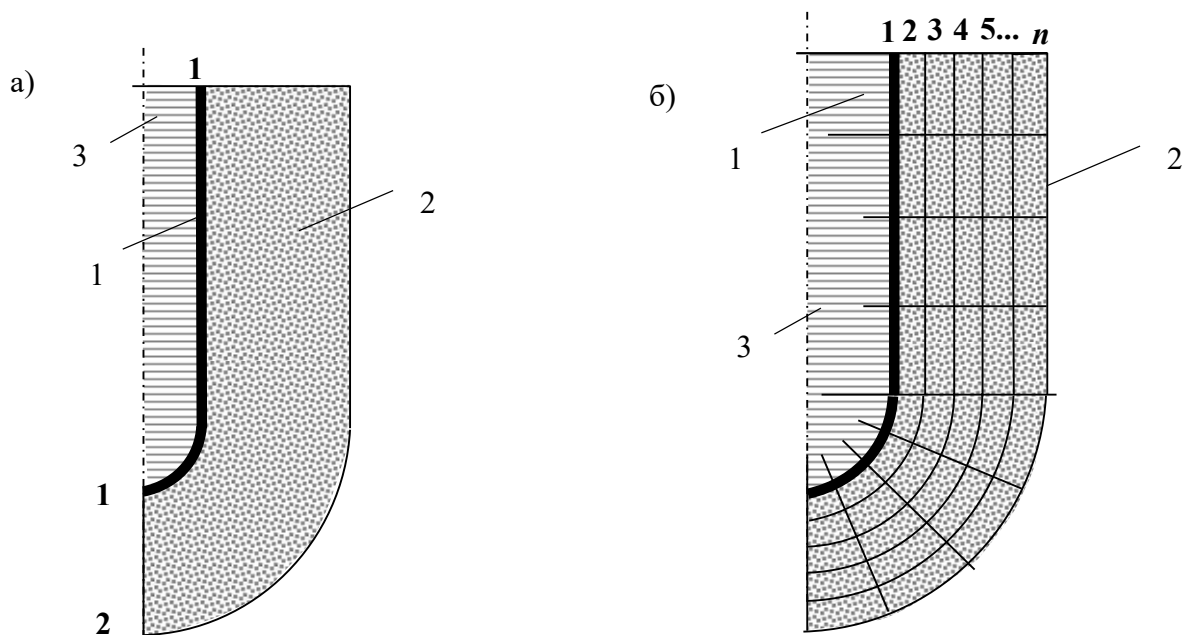


Рис. 1. Схематичный вид излома ОФ после прокаливания: а – двухслойная электрофоретическая оболочка: 1 – облицовочный слой (≈ 1 мм); 2 – форетический слой (5...15 мм); 3 – блок моделей; б – многослойная традиционная оболочковая форма: 1 – облицовочный слой (≈ 1 мм); 2 – 2... n упрочняющие слои (5...15 мм); 3 – блок моделей

Время формообразования двухслойной электрофоретической оболочки (ЭФО) составляет 3...4 мин, а каждого слоя многослойной оболочки – 5...10 мин.

Традиционно принимается, что макроструктура электрофоретической ОФ условно представлена плотной керамикой. В качестве наполнителя или обсыпочногo материала ЭФО используется кварцевый песок различной фракции или другой какой-либо более огнеупорный материал.

Если быть более точным, ЭФО являются двухслойными, при этом толщина первого облицовочного (токопроводного) слоя составляет до 1 мм и значительно меньше второго (форетического) – 6...8 мм и более. В целом на практике такие оболочки условно называют однослойными. Оптимальное соотношение фракций огнеупорного наполнителя в форетическом слое должно быть 70 % крупной фракции и 30 % мелкой фракции. Соотношение размеров зерен при этом должно быть не менее чем 1:10 [3].

Фракция обсыпчного материала определяет толщину формообразующейся ОФ.

В последние годы находят применение многослойные ОФ с разнородными слоями и различными вариантами их сочетаний по толщине ОФ (см. рис. 3). Это позволяет еще на стадии проектирования технологического процесса смоделировать нужную макро- и микроструктуру ОФ, ее свойства и варианты сочетаний слоев по толщине ОФ, формируемых как по традиционной технологии, так и ЭФО оболочек. Кроме того, и наружный (в нашем случае 5-й слой) формируется нетрадиционно только в исключительных случаях, т.е. когда требуется получить специфические свойства у ОФ и если это технологически возможно и обоснованно.

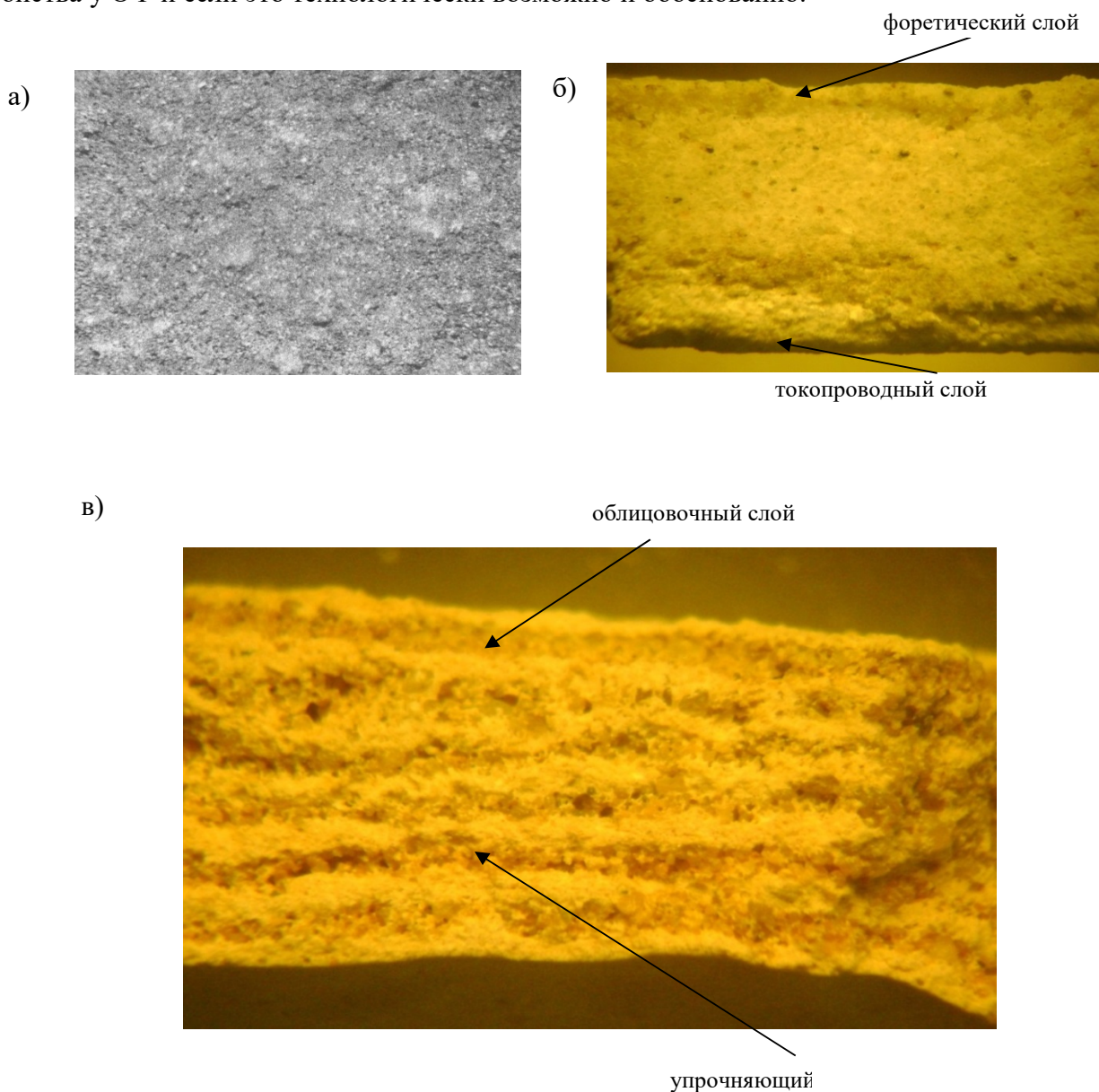


Рис. 2. Макроструктура фрагментов изломов оболочковых форм, полученных методом электрофореза (а, б), и многослойной ОФ (в) (увеличение X48)

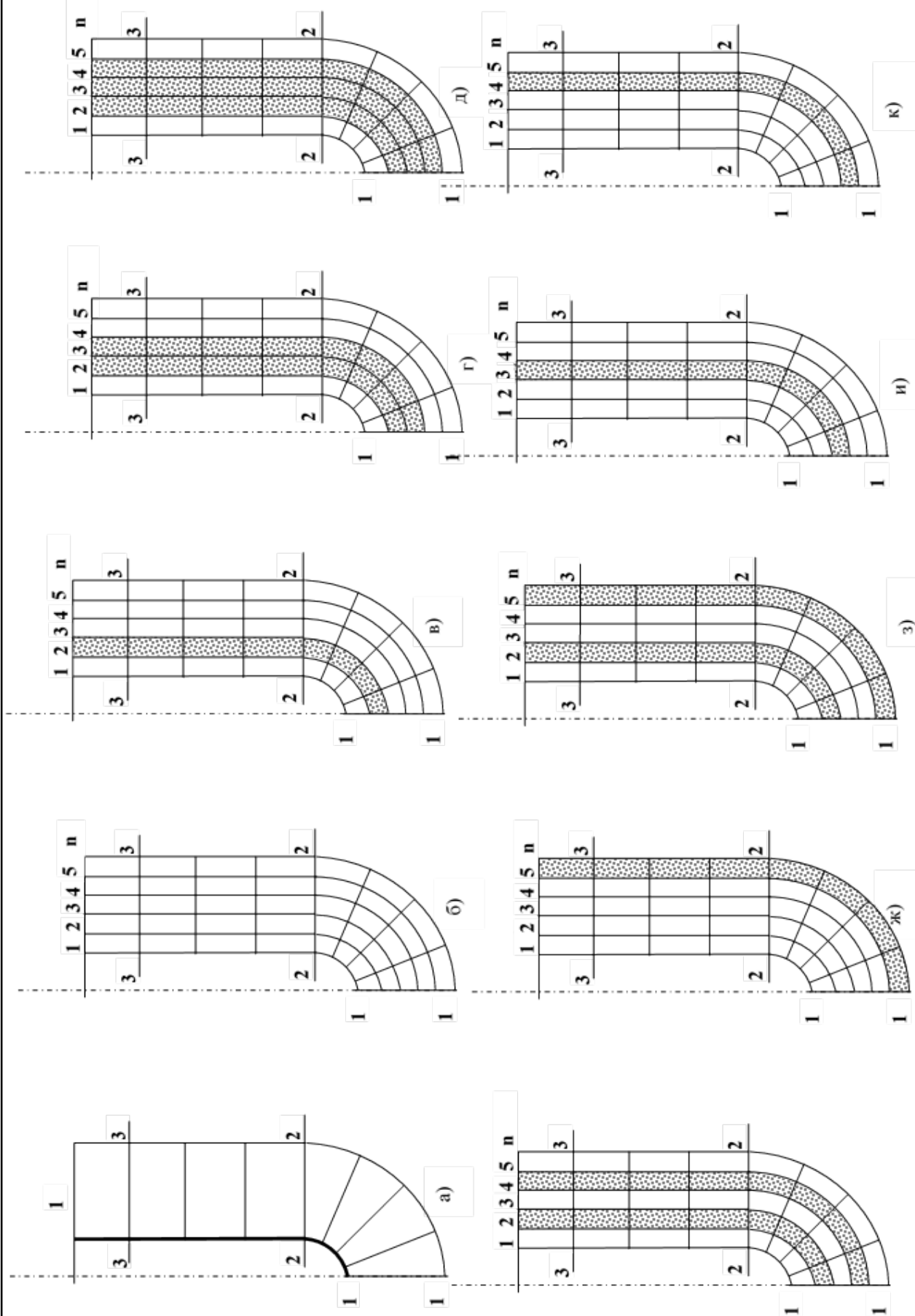


Рис. 3. Варианты сочетаний разнородных слоев в структуре одно- и многослойных оболочковых форм



Все эти новые подходы направлены на регулирование напряженно-деформированного состояния ОФ в процессе их формообразования и применения.

Основными технологическими операциями, ответственными за НДС ОФ, являются: послойная сушка, выплавление моделей, прокаливание ОФ, заливка их расплавом и затвердевание отливки.

Технологические операции и факторы, определяющие трещинообразование в ОФ, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические операции и факторы, определяющие трещинообразование в ОФ

| Технологическая операция | Факторы, влияющие на НДС ОФ |
|---|--|
| Формирование огнеупорной оболочки на выплавляемой модели с последующей сушкой | 1. Усадка оболочковой формы. 2. Деформация удаляемой модельной массы |
| Удаление модели из ОФ | 1. Дальнейшее развитие усадочных процессов. 2. Расширение модельного состава при нагреве |
| Нагрев и прокаливание формы | 1. Градиент температур по толщине формы. 2. Фазовые превращения огнеупорного материала. 3. Обжиг и спекание огнеупорного наполнителя |
| Заливка формы сплавом с дальнейшим охлаждением | 1. Гидростатическое воздействие жидкого металла на ОФ во время ее заливки. 2. Градиент температур по толщине формы. 3. Фазовое расширение огнеупорного наполнителя |

Трещинообразование при послойной сушке покрытий и ОФ связано главным образом с нарушением технологических режимов сушки или механическими повреждениями и не сопровождается большими значениями НДС покрытия. Величина НДС в литейной форме увеличивается из-за усадочных процессов, появляющихся при испарении растворителя и химической полимеризации связующего. Далее увеличение напряжений и деформаций в форме возможно за счет изменения объема выплавляемой модели и ее деформации, вызванной как изменением температуры окружающей среды, так и силовым действием на модель со стороны наносимой на нее огнеупорной суспензии.

Проведенные исследования процессов усадки огнеупорных наполнителей, используемых для получения форм, выявили, что огнеупорная масса на основе этилсиликатного связующего имеет усадку во время сушки при комнатной температуре и составляет 0,2...0,25 %, а огнеупорная оболочка, осажденная методом электрофореза и пропитанная жидкостекольным связующим, имеет усадку 0,12...0,15 %. Также в ходе экспериментов было выявлено, что напряжения, возникающие в литейных формах вследствие усадки, частично релаксируются при выплавлении модели. В ходе работы изготавливали две партии форм. Первую наносили на недеформируемые модели из алунда, вторую – на модели из парафино-стеариновой массы. В итоге после сушки на всех оболочках, осажденных на алундовые модели, образовались сквозные протяженные трещины (см. рис. 4, а), а на оболочках, сформированных на модели из ПС 50/50, трещины отсутствовали (см. рис. 4, б). Если учесть эти экспериментальные факты, то вклад этой технологической операции на величину НДС формы можно исключить.

Вторым значимым этапом роста НДС ОФ является операция выплавления моделей из ОФ.

На рис. 5 представлены инженерные расчетные схемы ОФ при выплавлении легкоплавких моделей в горячей воде при температуре +98...+100 °С.

Основной причиной формирования трещин в литейных формах при выплавлении моделей является расширение модельной массы при нагревании до температуры плавления [1].

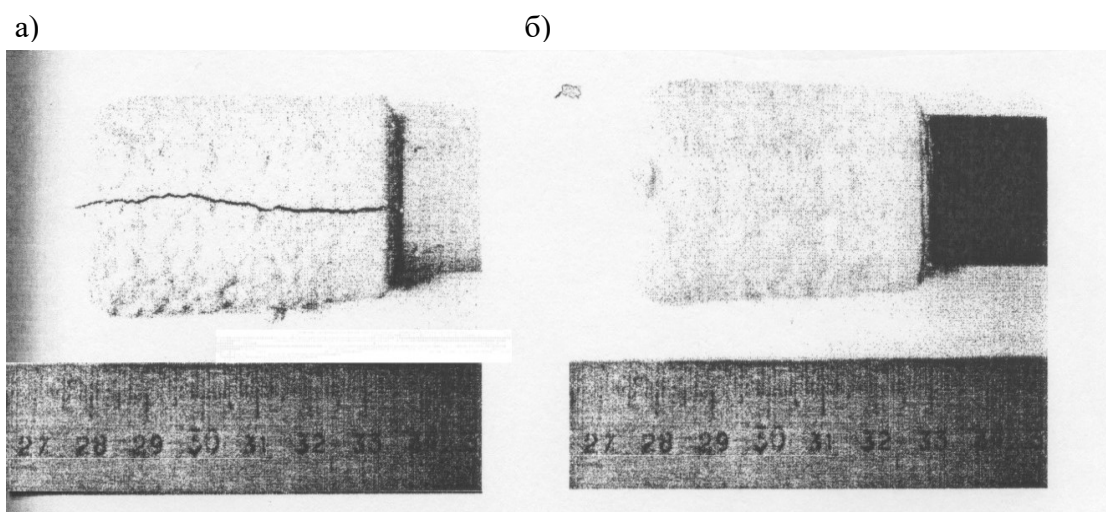


Рис. 4. Экспериментальные оболочки после пропитки и сушки: а – на модели, изготовленной из алунда; б – на модели, изготовленной из модельной массы

В то же время проведенные авторами [15] исследования выявили, что рост НДС ОФ в процессе удаления модели происходит по двум причинам (см. рис. 6): 1) усадка огнеупорной массы ОФ при ее нагреве (см. рис. 6, кривая 1); 2) расширение модельной массы при нагревании (см. рис. 6, кривая 2) до температуры плавления.

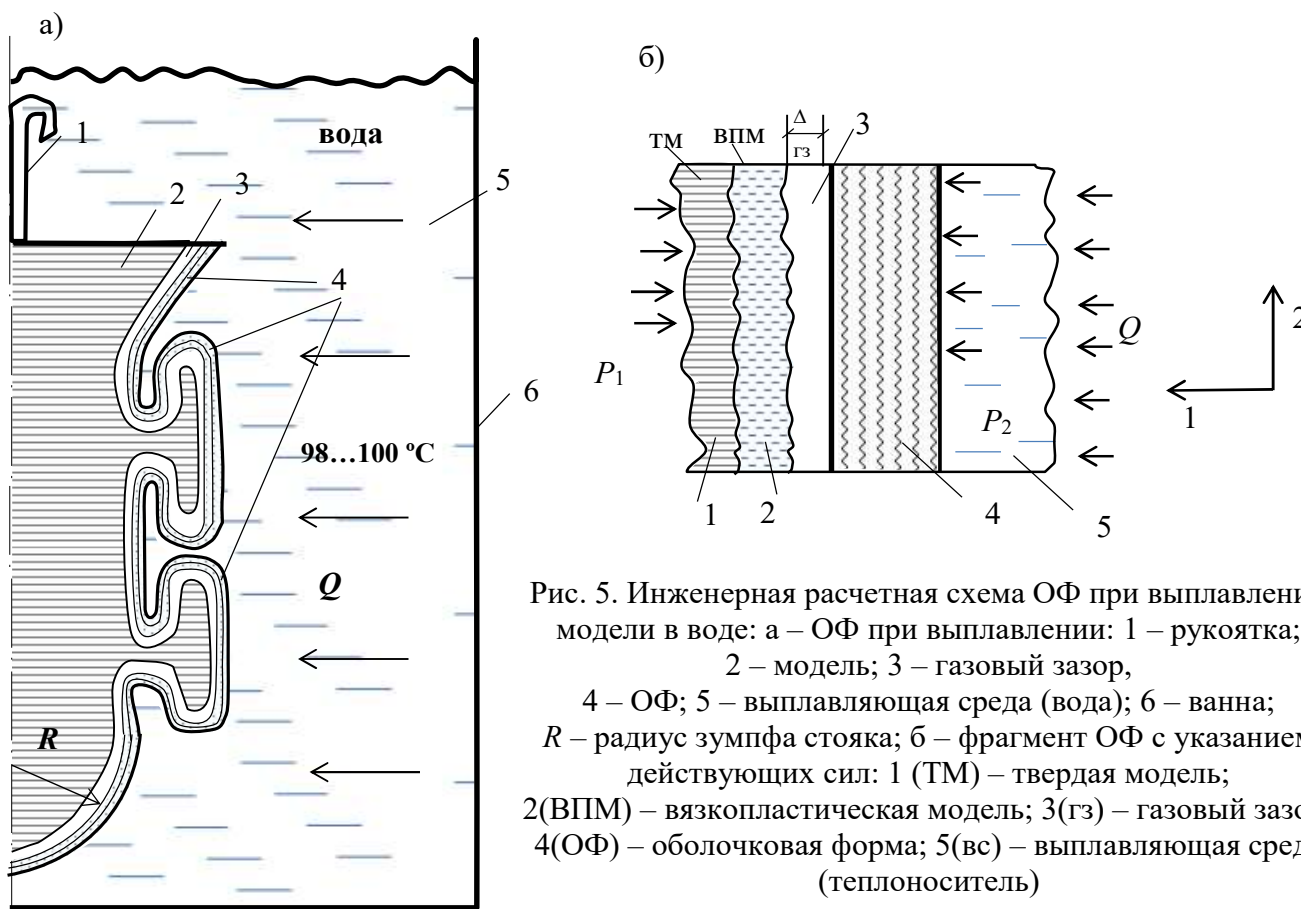


Рис. 5. Инженерная расчетная схема ОФ при выплавлении модели в воде: а – ОФ при выплавлении: 1 – рукоятка; 2 – модель; 3 – газовый зазор, 4 – ОФ; 5 – выплавляющая среда (вода); 6 – ванна; R – радиус зумпфа стояка; б – фрагмент ОФ с указанием действующих сил: 1 (ТМ) – твердая модель; 2 (ВПМ) – вязкопластическая модель; 3 (гз) – газовый зазор; 4 (ОФ) – оболочковая форма; 5 (вс) – выплавляющая среда (теплоноситель)

При удалении модели ее действие на форму, вызванное расширением модельного состава при нагревании, будет идти только до образования расплава модельной массы на границе раздела

форма-модель. Как только образуется прослойка расплава модельной массы, появляется возможность ее вытеснения либо за пределы формы, либо в поры оболочки, при этом силовое воздействие на ОФ расширяющейся модельной массы будет сведено до минимума.

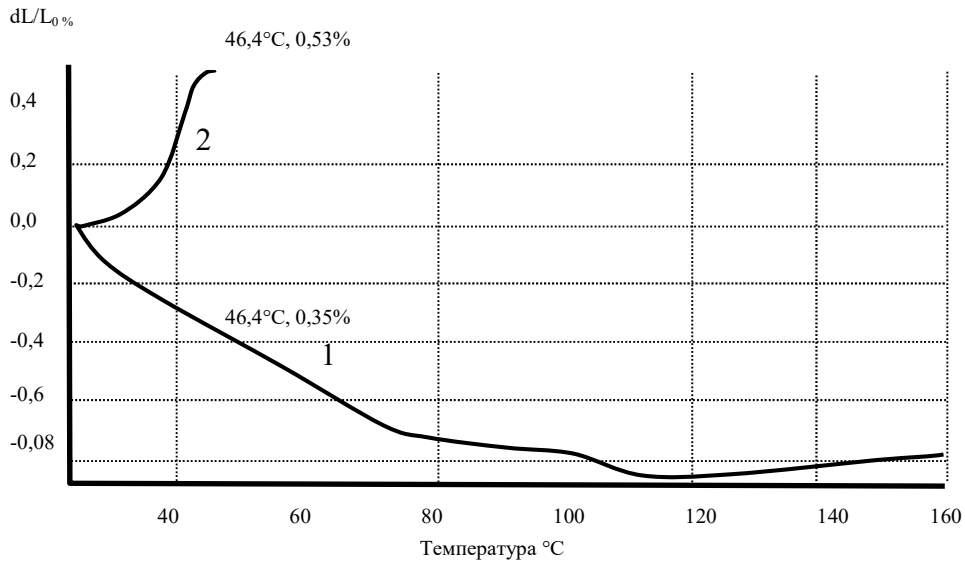


Рис. 6. Изменение линейных размеров образцов оболочки (кривая 1) и модельной массы (кривая 2) при нагреве

Изучение температурных полей (см. рис. 7) в модели во время выплавления показало, что при начале плавления модельной массы на границе оболочка-модель глубина прогретшегося слоя модели до температуры выше начальной незначительна и составляет не более 4 мм (см. рис. 7, кривая 2), при этом основная часть модели не успевает прогреться.

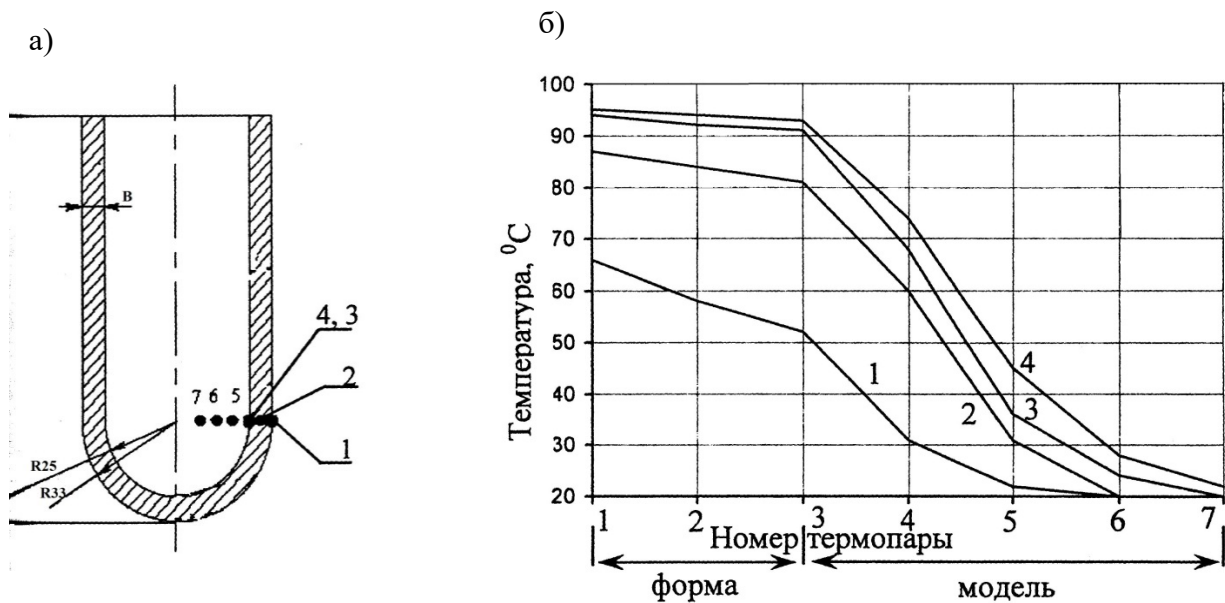


Рис. 7. Температурные поля в слое оболочковой формы и модели: а – схема расположения термопар в форме и модели; б – температурные поля: 1 – через 30 с после начала выплавления; 2 – 60 с; 3 – 90 с; 4 – 120 с

При сопоставлении результатов dilatометрических исследований модельного состава и результатов исследований температурных полей модели во время удаления становится ясным, что деформации, вызываемые расширением модели во время ее удаления, крайне малы. Однако нужно учитывать тот факт, что чем ниже температура выплавляющей среды, тем выше вероятность образования трещин в ОФ за счет расширения модельного состава, т.к. в этом случае увеличивается время прогрева формы до температуры плавления модельного состава и модель прогревается до высоких температур практически по всему ее объему [16].

Прокаливание ОФ является обязательной технологической операцией для всех типов керамических форм, включающей нагрев и изотермическую выдержку формы при определенной температуре. Прокаливание проводят в окислительной газовой среде. При прокаливании ОФ нагревают до температуры +800...+1100 °С и выдерживают при данной температуре в зависимости от способа формовки в течение 30...180 мин. При этом протекает ряд физических процессов [1]: нагрев оболочки; удаление из нее газотворных составляющих, источниками которых являются влага и остатки модельного состава и продуктов деструкции связующего; окончание процесса гидролитической поликонденсации связующего; термическое расширение оболочки и полиморфные превращения; образование капиллярных каналов. Обычно процесс прокаливания осуществляют двумя способами:

1. прокаливание без опорного наполнителя (истинно ОФ);
2. прокаливание в опорном наполнителе.

Время прокаливания без опорного наполнителя составляет до 1...3 ч, а в опорном наполнителе – 6...8 ч.

При прокаливании форма подвергается термическому воздействию (см. рис. 8). Поэтому очевидно, что рост напряжений в ОФ будет зависеть от скорости и температуры ее прогрева. Высокая скорость нагрева приведет к значительному градиенту температур по толщине формы и, как следствие, к значительному росту напряжений. При определенных температурах нагрева формы возможны как рост напряжений (фазовые переходы кварцевой основы ОФ), так и их релаксация (спекание). Результаты исследований и их сравнительный анализ показывают, что поведение всех расчетных параметров и их абсолютные значения определяются температурным перепадом по толщине оболочки и свойствами керамики при данной температуре. Таким образом, практика использования ОФ в ЛВМ показывает, что наибольшая вероятность образования трещин связана с операцией прокаливания и заливки форм расплавом металла, где происходит значительный температурный переход между слоями оболочковой формы.

В работах [10; 11] выполнено математическое моделирование НДС ОФ и теоретический прогноз трещинообразования в них.

Теоретическое прогнозирование трещинообразования в многослойных осесимметричных оболочковых формах представлено в работе [10], а математическое моделирование напряженно-деформированного состояния осесимметричных многослойных оболочковых литейных форм – в работе [11].

В данной работе закладываются технологические предпосылки для будущего математического моделирования на основе фундаментальных уравнений механики деформируемого твердого тела и уравнения теплопроводности и подготавливаются условия для построения математической модели процесса прокаливания, заливки стали в ОФ и кристаллизации отливки. Для решения сформулированной системы уравнений будет использован апробированный численный метод [9].

На рис. 8-10 приведены технологические схемы и инженерные расчетные схемы прокаливания (см. рис. 8), заливки ОФ жидким металлом (см. рис. 9), охлаждения и затвердевания отливки (см. рис. 10).

Представленные расчетные схемы являются основой для математического моделирования перечисленных технологических схем формообразования ОФ и их применения.

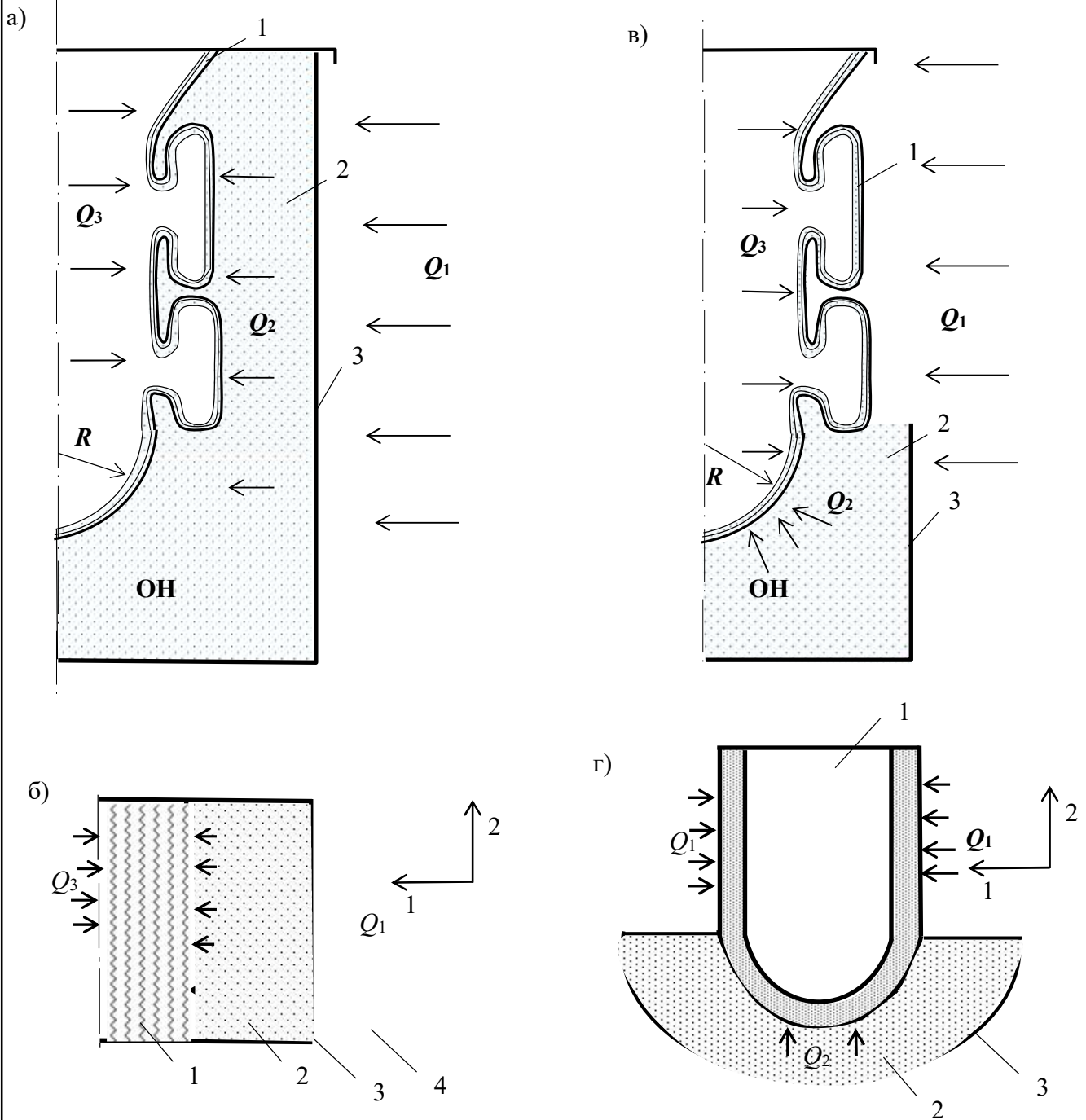


Рис. 8. Инженерная расчетная схема НДС ОФ при прокаливании: а – в опорном наполнителе (ОН); б – истинно оболочковых форм: 1 – оболочковая форма; 2 – опорный наполнитель; 3 – поддон с опорным наполнителем; 4 – теплоноситель; в – фрагмент ОФ в опорном наполнителе с указанием действующих сил; г – фрагмент истинно ОФ форм с указанием действующих сил

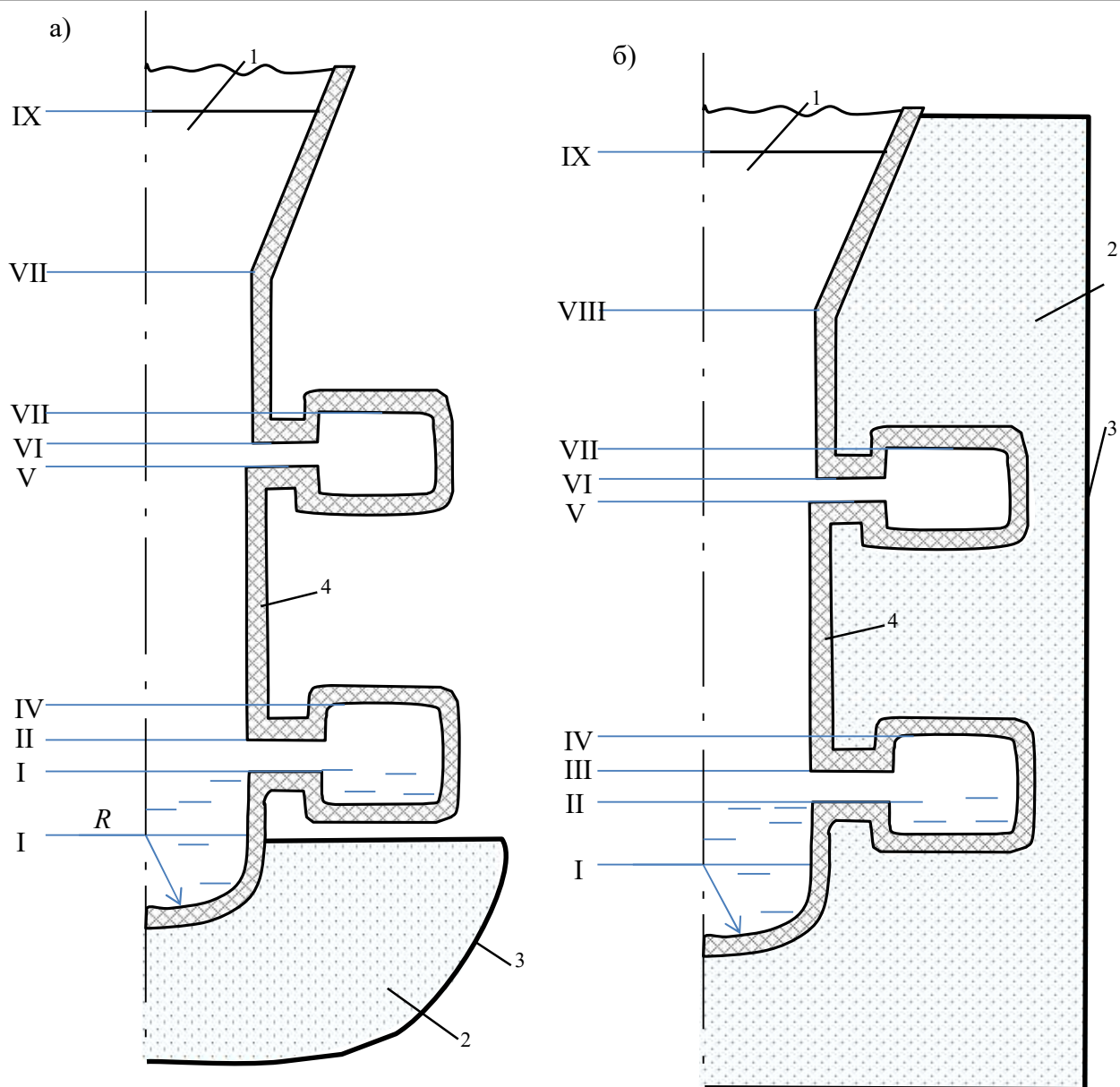


Рис. 9. Схема заливки ОФ жидким металлом: а – истинно ОФ;
 б – в опорном наполнителе: I-IX – контрольные уровни заливки по высоте ОФ;
 1 – жидкий металл; 2 – опорный наполнитель; 3 – поддон; 4 – ОФ

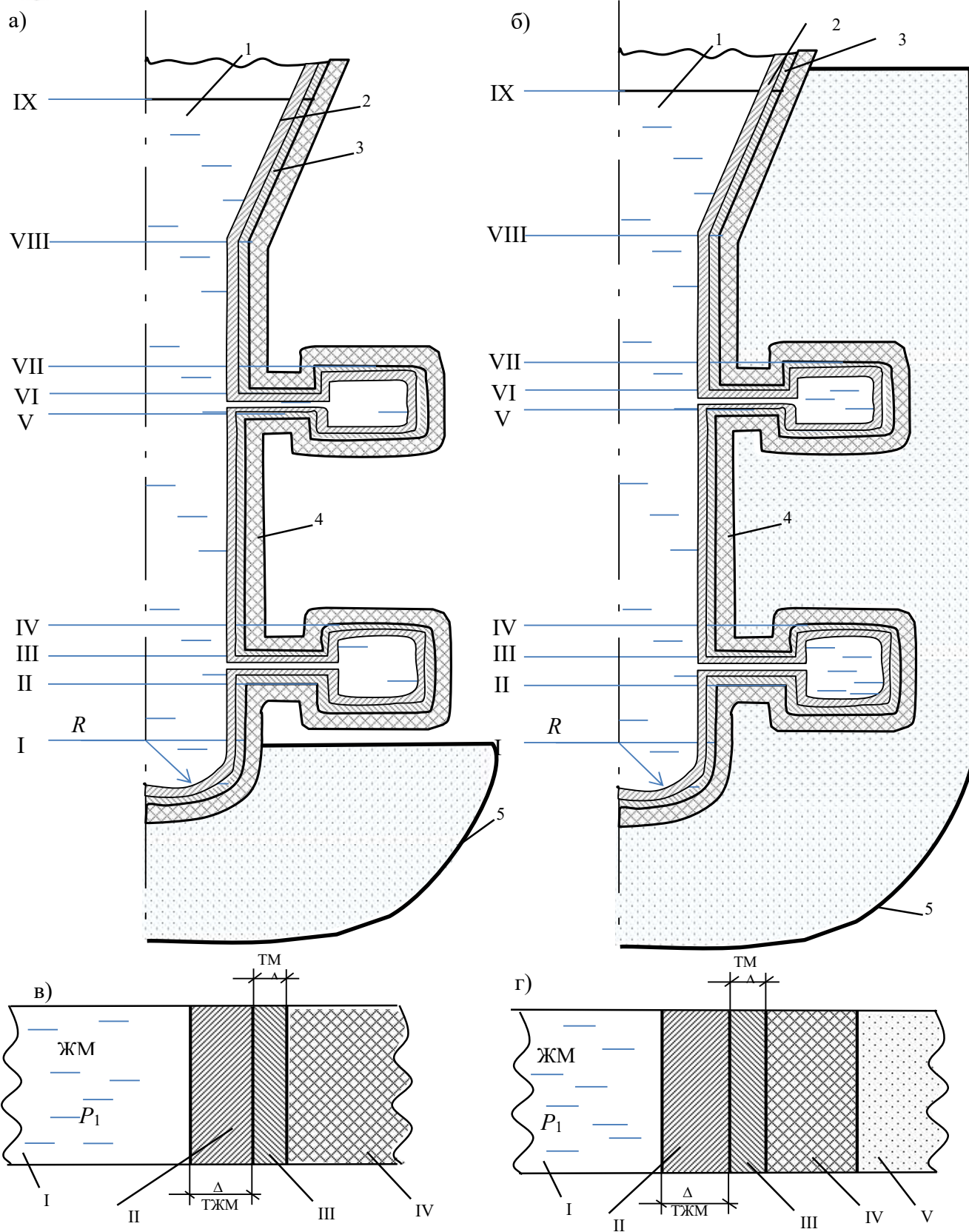


Рис. 10. Схема охлаждения и затвердевания отливок: а – истинно ОФ; б – в опорном наполнителе: I...IX – контрольные уровни заливки по высоте ОФ; 1 – жидкий металл; 2 – твердожидкий слой металла; 3 – твердый слой металла; 4 – ОФ; 5 – поддон с ОН; в – расчетная схема моделирования НДС ОФ с указанием областей системы: I – жидкий металл; II – твердожидкий металл, III – твердый металл; IV – ОФ; г – расчетная схема моделирования НДС ОФ с указанием областей системы: I – жидкий металл; II – твердожидкий металл, III – твердый металл; IV – ОФ; V – ОН

Выводы

Данное исследование предшествует математическому моделированию различных технологических вариантов процессов формообразования ОФ и является частью подготовительной базы для моделирования рассматриваемых технологических процессов.

В последующей завершающей статье с использованием настоящих методологических предпосылок будут представлены итоги математических расчетов процессов формообразования на основе численного метода, предложенного профессором В. И. Одинокоевым.

Таким образом, в данной работе заложены общие технологические принципы методологии моделирования НДС ОФ в литье по выплавляемым моделям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литье по выплавляемым моделям / В. Н. Иванов, С. А. Казеннов, Б. С. Курчман и др.; под общ. ред. А. И. Шкленника, В. А. Озерова. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
2. Репях, С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям / С. И. Репях. – Днепропетровск: Лира, 2006. – 1056 с.
3. Рыжков, И. В. Электрофорез в литейном производстве: изготовление оболочковых форм по выплавляемым моделям / И. В. Рыжков. – Харьков: Выща школа, 1979. – 160 с.
4. Петров, В. В. Математическое моделирование процесса кристаллизации металла в оболочковой осесимметричной форме / В. В. Петров, В. И. Одинокоев, М. В. Салина // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 9. – С. 41-45.
5. Одинокоев, В. И. Численное исследование процесса деформации материалов бескоординатным методом / В. И. Одинокоев. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 168 с.
6. Одинокоев, В. И. Эволюция напряжённого состояния керамической формы при нестационарном внешнем тепловом воздействии / В. И. Одинокоев, Г. М. Севастьянов, И. Г. Сапченко // Математическое моделирование. – 2010. – Т. 22. – № 11. – С. 97-108.
7. Севастьянов, Г. М. Оптимизация структуры пористых огнеупорных керамических форм / Г. М. Севастьянов, В. К. Одинокоев, И. Г. Сапченко // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2010. – № 4(27). – С. 101-108.
8. Севастьянов, Г. М. Трещинообразование в керамических формах при заливке металла / Г. М. Севастьянов, В. К. Одинокоев, И. Г. Сапченко // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 10. – С. 25-28.
9. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одинокоев, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков, А. В. Баков. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
10. Mathematical modelling of stress-strain state of multilayer shell molds / A. I. Evstigneev, V. I. Odinokov, A. V. Sviridov, E. A. Dmitriev, V. V. Petrov // Materials Science Forum ISSN: 1662-9752. – Vol. 857. – P. 565-572.
11. Theoretical prediction of crack formation in axisymmetric multilayer shell molds / A. I. Evstigneev, V. I. Odinokov, A. V. Sviridov, E. A. Dmitriev, V. V. Petrov // Materials Science Forum ISSN: 1662-9752. – Vol. 857. – P. 573-577.
12. Одинокоев, В. И. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора УНРС / В. И. Одинокоев, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – № 6. – С. 493-499.
13. Математическое моделирование процессов, протекающих во взаимодействующих друг с другом средах / В. И. Одинокоев, А. М. Шпилев, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, А. В. Свиридов // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – № 8. – С. 23.
14. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния оболочковых форм при литье по выплавляемым моделям / А. И. Евстигнеев, В. И. Одинокоев, В. В. Петров, Э. А. Дмитриев. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 130 с.
15. Евстигнеев, А. И. Образование трещин в электрофоретических оболочковых формах / А. И. Евстигнеев, В. В. Петров, Э. А. Дмитриев // Литейное производство. – 2009. – № 5. – С. 17-18.
16. Снижение брака оболочек при их прокаливании / А. И. Евстигнеев, В. В. Петров, В. И. Куренков [и др.] // Литейное производство. – 1992. – № 4. – С. 20-21.



Кравченко А. С., Бахматов П. В., Мазур С. П., Пицык В. С.
A. S. Kravchenko, P. V. Bakhmatov, S. P. Mazur, V. S. Pitsyk

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА СВАРКИ АВИАЦИОННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ ШВОВ**

**INFLUENCE OF THE WELDING MODE OF AERONAUTICAL STAINLESS STEEL
PIPELINES FOR WELD DEFECTS**

Кравченко Александр Сергеевич – студент кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: mim@knastu.ru.

Mr. Alexandre A. Kravchenko – student, Mechanical Engineering and metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: mim@knastu.ru.

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: mim@knastu.ru.

Mr. Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Mechanical engineering and metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: mim@knastu.ru.

Мазур Сергей Петрович – кандидат технических наук, главный сварщик филиала ПАО «Компания “Сухой” “КНААЗ им. Ю. А. Гагарина”» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: info@knaapo.com.

Mr. Sergey P. Mazur – PhD in Engineering, Welding Manager, the Branch of PJSC Sukhoi Company Komsomolsk-on-Amur Aircraft Plant named after Yuri Gagarin (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: info@knaapo.com.

Пицык Виктор Сергеевич – аспирант кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: mim@knastu.ru.

Mr. Viktor S. Pitsyk – Post-Graduate Student, Mechanical Engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: mim@knastu.ru.

Аннотация. В работе произведен анализ статистики дефектов сварного авиационного нержавеющей трубопровода и на основании полученных данных проведены исследования по оптимизации режимов ручной аргонодуговой сварки неплавящимися вольфрамовыми электродами с подачей присадочной проволоки. Также в работе детально представлены методика проведения исследований и их основные результаты.

Summary. The article presents statistical analysis of defects in welded aviation stainless steel pipelines. Based on the data the authors provide research to optimize the modes of manual TIG welding with consumable tungsten electrodes using a wire feeding. Besides, the authors present the technique of research and its main results.

Ключевые слова: трубопровод из нержавеющей стали, аргонодуговая сварка, дефекты сварных соединений.

Key words: stainless steel pipeline, argon arc welding, defects of welded joints.

УДК 621.791

Ведение

Летательные аппараты (ЛА) являются наиболее сложными и совершенными машинами с конструктивной точки зрения – в них присутствует огромное число различных систем и агрегатов, поддерживающих работоспособность всей машины. При этом не малая часть этих систем включа-

ет в себя различного рода трубопроводы. К наиболее важным и жизненно-необходимым системам ЛА, включающим в себя различного рода и конфигурации трубопроводные системы, можно отнести: топливную систему; гидро- и пневмосистемы; масляную систему; систему пожаротушения; систему очистки и кондиционирования воздуха [1].

Практически все трубопроводные системы (ТПС) ЛА металлические и сварные [2]. В условиях филиала ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина»» ежедневно производится сварка элементов ТПС как из алюминиевых и титановых сплавов, так и из нержавеющей стали. Отличительными особенностями ЭТПС ЛА являются небольшая толщина (0,8-1,5 мм) и довольно небольшие диаметры (12-60 мм), сложная трехмерная геометрия, поэтому преобладающим способом их соединения выбрана ручная аргодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом с присадкой, где стоит учитывать, что получение стабильных геометрических характеристик на всей протяженности сварного шва определяется в равной степени режимами сварки и квалификацией сварщика, выполняющего сварные швы.

Как показывает статистика рентгенографического анализа основных видов дефектов элементов сварных трубопроводных систем ЛА из нержавеющей стали за период с 2011 по 2015 гг. (см. рис. 1), в которой оценено 14 425 стыков, общий процент дефектных стыков (требующих доработки) составил 32,51 % (4690 стыков), при этом число стыков, ушедших в брак, не превышает 5,5 % (258 стыков) от общего числа дефектных. Несмотря на достаточно низкий общий процент брака, число стыков, требующих исправления дефектов после первого предъявления, составляет достаточно большой объем.

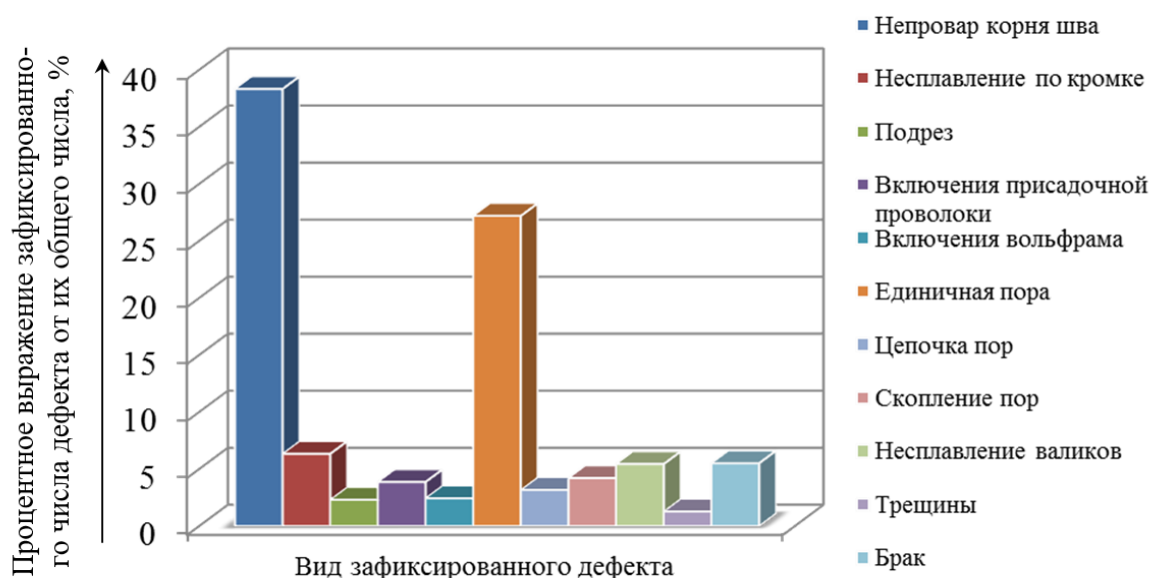


Рис. 1. Статистика дефектов стальных нержавеющей сварных авиационных трубопроводов

Из рис. 1 видно, что основную массу дефектов при изготовлении сварных стальных нержавеющей трубопроводов составляют непровары в корне шва (более 38 % от общего числа дефектов) и поры как единичного, так и группового характера (более 34 % от общего числа дефектов). Дефекты, процентное выражение которых от общего числа выявленных дефектов не превышает 10 %, можно считать случайными.

Цели и задачи исследования

Результаты статистики дефектов стальных сварных нержавеющей трубопроводов авиационного назначения показывают, что существенный объем деталей после первого предъявления при контроле качества требует доработки и исправления дефектов. Необходимость данных технологических операций существенно увеличивает затраты на производство, сроки изготовления готовых деталей, требует организации дополнительных производственных мест; все это увеличивает общие затраты на производство.

Анализ основных причин систематического появления дефектов типа непроваров в корне шва и пор показал, что это связано в первую очередь с некорректными режимами сварки и несоблюдением требований выполнения сварных соединений.

Наблюдение за процессом выполнения сварочных работ непосредственно на рабочих метлах подтверждает сказанное. Нередко при выполнении стыков сварщики используют режимы, отличные от указанных в технологической карте, стыки выполняются не в том пространственном положении, сварка выполняется без продувки корня шва аргоном. Кроме того, в ряде случаев сварка производится не в указанное время – превышен срок хранения заготовок, подготовленных под сварку, а повторная зачистка, обезжиривание и обезвоживание стыков не производятся.

Таким образом, основная цель данной работы – снижение вероятности появления основных дефектов (пор и непроваров в корне шва) при сварке ЭТПС из нержавеющей стали посредством оптимизации режимов ручной аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом с подачей присадочной проволоки. Для достижения основной цели необходимо решение следующих задач:

1. оценить влияние наличия защиты корня шва на образование пор и образование непроваров в корне шва;
2. оценить влияние силы сварочного тока на образование пор и образование непроваров в корне шва;
3. оценить влияние угла заточки вольфрамовых электродов на образование пор и непроваров в корне шва;
4. определить оптимальные режимы ручной аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом с подачей присадочной проволоки, обеспечивающие минимальную вероятность образования пор и непроваров в корне шва;
5. разработать комплекс рекомендаций по оптимизации процесса сварки стального нержавеющей авиационного трубопровода.

Методика проведения исследований

Образцы-имитаторы изготавливались из обечаек с одним продольным швом, размеры обечаек: наружный диаметр 63 мм, длина 75 мм, толщина стенки – 1 мм, материал обечаек – сталь марки 12X18H10T. Подготовка кромок перед сваркой как с внешней, так и с внутренней стороны на ширину не менее 20 мм осуществлялась в соответствии с требованиями ПИ 1.4.748-80 «Дуговая сварка трубопроводов из нержавеющей сталей в среде инертных газов», а именно: не более чем за 2 ч до сварки кромки механически зачищались до металлического блеска, затем обезжиривались ацетоном и обезвоживались спиртом.

Для сварки использовался сварочный инвертор марки MasterTig AC/DC 3500W совместно со сварочной горелкой марки ТТК 350W. Сварочные материалы: вольфрамовые электроды марки ЭВЛ-2 (WL-20) Ø 2 мм; присадочные прутки Св-06X19H9Т Ø 1,6 мм; аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-79 [3].

Поскольку имеется базовый технологический процесс изготовления стальных нержавеющей трубопроводов авиационного назначения ручной электродуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона с подачей присадочной проволоки, то в качестве базового уровня примем значения входных параметров, используемые в описанном технологическом процессе. Шаг регулирования по силе тока принимаем равным 10 А, шаг регулирования по величине угла заточки электрода принимаем равным 10°. Что касается характера защиты корня шва, то согласно базовому технологическому процессу должна осуществляться продувка аргоном. Но фактически это не реализуется, в данных исследованиях оценим влияние наличия защиты корня шва на качество выполнения сварных работ. В табл. 1 приведена программа проведения экспериментов. Отметим, что для получения более достоверных данных каждый эксперимент повторялся не менее 5 раз. Каждый шов наплавлялся в 4 сегмента. Сварка велась в нижнем положении с гашением дуги для поворота заготовки.

Для заточки вольфрамовых электродов использовалась специальная машинка марки WEG 4.0.

Таблица 1

Программа экспериментов

| Номер эксперимента | Сила сварочного тока, А | Угол заточки электрода, град | Защита корня шва |
|--------------------|-------------------------|------------------------------|------------------|
| 1 | 60 | 45 | Нет |
| 2 | 60 | 45 | Продув аргоном |
| 3 | 50 | 45 | Продув аргоном |
| 4 | 70 | 45 | Продув аргоном |
| 5 | 60 | 35 | Продув аргоном |
| 6 | 60 | 55 | Продув аргоном |
| 7 | 50 | 35 | Продув аргоном |
| 8 | 70 | 55 | Продув аргоном |

Для проведения визуально-измерительного контроля качества сварных швов, а также контроля размеров образцов и оценки их состояния использовался набор ВИК-1 [4]. Для выявления внутренних дефектов использовался рентгено-телевизионный комплекс FILIN-240 / 225.FP8.C-ARM. Размерность и отклонения геометрических параметров шва и внутренних дефектов сварных соединений оценивали по ПИ 1.4.748-80 «Дуговая сварка трубопроводов из нержавеющей стали в среде инертных газов». Сварное соединение С00000. Для изготовления образцов для оценки механических свойств сварных соединений использовался настольный абразивный станок марки AbrasiMet 250 (Buehler, Германия).

Испытания образцов на статическое растяжение проводили на испытательной машине Instron 3382 в соответствии с требованиями ГОСТ 6996-66. Для этого подготовлены образцы типа XIII с размерами 150×15×1 мм.

Результаты исследований и их оценка













С целью определения влияния параметров процесса ручной аргонодуговой сварки на качество сварного соединения при выполнении неповоротных стыков труб из нержавеющей стали авиационного назначения для всех выполненных образцов-имитаторов проведен внешний осмотр и измерения. Результаты внешнего осмотра и измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты внешнего осмотра сварных образцов первой серии экспериментов

| Номер режима | Внешний вид | | Результат визуального осмотра и измерения наружных дефектов (при наличии) | Заключение по режиму |
|--------------|---|---|--|----------------------|
| | корня шва | усиления шва | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 |  |  | Сильное окисление корня шва, неудовлетворительная шероховатость. Наплывы на внутренней поверхности трубы в области корня шва | Некорректный |
| 2 |  |  | Нестабильные геометрические параметры сварного шва, но попадают в допустимый диапазон варьирования | Корректный |

Продолжение табл. 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|--------------|
| 3 |  |  | Непровар корня. Подрез. Нестабильные геометрические параметры сварного шва. Сварное соединение имеет наружные дефекты, требующие доработки и исправления | Некорректный |
| 4 |  |  | Неудовлетворительная геометрия сварного соединения (отрицательное значение усиления корня шва). Значительные колебания геометрических параметров сварного соединения. Сварное соединение имеет наружные дефекты, требующие доработки и исправления | Некорректный |
| 5 |  |  | Неудовлетворительная геометрия сварного соединения (отрицательное значение усиления корня шва). Образование наплывов в корне шва. Сварное соединение существенных наружных дефектов не имеет, однако геометрические характеристики сварного соединения не стабильны на всей протяженности, но попадают в допустимый диапазон варьирования | Корректный |
| 6 |  |  | Нестабильные геометрические параметры сварного шва. Сварное соединение существенных наружных дефектов не имеет, однако геометрические параметры сварного соединения не стабильны на всей протяженности, имеются участки, где усиление сварного шва равно нулю или образуется вогнутость, что не допустимо | Некорректный |
| 7 |  |  | Непровар корня. Отклонение от геометрических параметров сварного соединения. Сварное соединение имеет наружные дефекты, требующие доработки и исправления | Некорректный |
| 8 |  |  | Незначительные колебания геометрических параметров сварочного соединения в зоне замка, не требующие исправления или доработки. Сварное соединение наружных дефектов, требующих исправления или доработки, не имеет | Корректный |

Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что наиболее оптимальными режимами сварки при ручной электродуговой сварке неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона при выполнении неповоротных стыков труб из нержавеющей стали авиационного назначения являются режимы, соответствующие образцам с номерами 2, 5 и 8. Из данных таблицы также видно влияние варьируемых параметров режима сварки на качество получаемого сварного соединения, которое имеет следующий характер:

1. Для получения качественного сварного соединения обязательна организация защиты корня шва. При отсутствии защиты высока вероятность возникновения внутренних дефектов типа пор, идет сильное окисление поверхности корня шва, вследствие чего он имеет неудовлетворительный внешний вид и шероховатость.

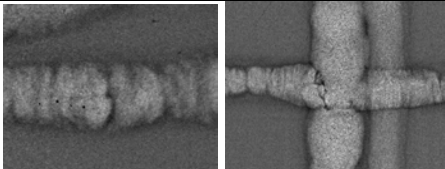
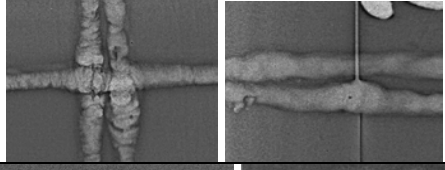
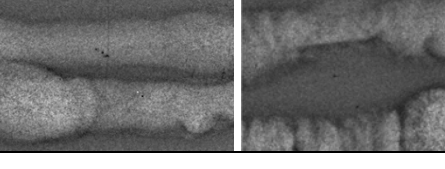
2. Изменение величины угла заточки электрода оказывает незначительное влияние на формирование геометрических параметров сварного соединения при прочих равных параметрах. Однако при увеличении силы сварочного тока значение угла заточки электрода оказывает более интенсивное воздействие на геометрические характеристики сварного соединения. Общие тенденции влияния данного параметра следующие: при уменьшении угла заточки электрода увеличивается проплавливающая способность дуги, это связано с повышением степени концентрации дуги и, как следствие, повышением ее тепловой мощности, в результате существенно увеличиваются ширина и высота корня шва, ширина усиления практически не изменяется, высота усиления уменьшается.

3. Существенное влияние на качество сварного соединения оказывает изменение силы сварочного тока. С увеличением данного параметра повышается стабильность процесса горения дуги, геометрические параметры сварного соединения изменяются следующим образом: существенно увеличиваются высота и ширина корня шва, незначительно увеличивается ширина усиления, высота усиления также увеличивается незначительно, но в силу малой толщины свариваемых деталей может наблюдаться тенденция к ее уменьшению. Стоит также отметить, что несмотря на увеличение общей стабильности процесса горения дуги с увеличением силы сварочного тока повышается вероятность получения сварного шва с нестабильной геометрией по длине. Это объясняется повышением влияния колебаний длины дуги на геометрические параметры сварного соединения с увеличением силы сварочного тока.

Результаты проведения рентгенотелевизионного контроля представлены в табл. 3. На основании данных таблицы построена гистограмма, отражающая вероятность появления внутренних дефектов при соответствующих режимах сварки (см. рис. 2). При составлении гистограммы учитывалось общее число валиков, наплавленных на соответствующем режиме сварки, – на каждом режиме сварки выполнялось по 5 образцов, каждый шов заправлялся в 4 сегмента, таким образом, число валиков, выполненных на каждом режиме сварки, составляет 20.

Таблица 3

Результаты рентгеноскопического контроля образцов, выполненных на различных режимах сварки

| № образца | Рентгенограммы характерных дефектов | Обнаруженные дефекты | Заключение о годности |
|-----------|---|--|-----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 |  | Одиночная пора – 5 шт.; цепочка пор – 1 шт.; скопление пор – 1 шт.; непровары в корне шва – 4 шт. | Не годен |
| 2 |  | Одиночная пора – 2 шт. | Не годен |
| 3 |  | Одиночная пора – 2 шт.; цепочка пор – 1 шт.; непровары в корне шва – 8 шт. | Не годен |
| 4 | - | Не выявлено | Годен |
| 5 | - | Не выявлено | Годен |

Продолжение табл. 3

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|----------|
| 6 |  | Одиночная пора – 2 шт.; Непровар в корне шва – 2 шт. | Не годен |
| 7 |  | Одиночная пора – 1 шт.; скопление пор – 1 шт.; непровар в корне шва – 4 шт. | Не годен |
| 8 | - | Не выявлено | Годен |

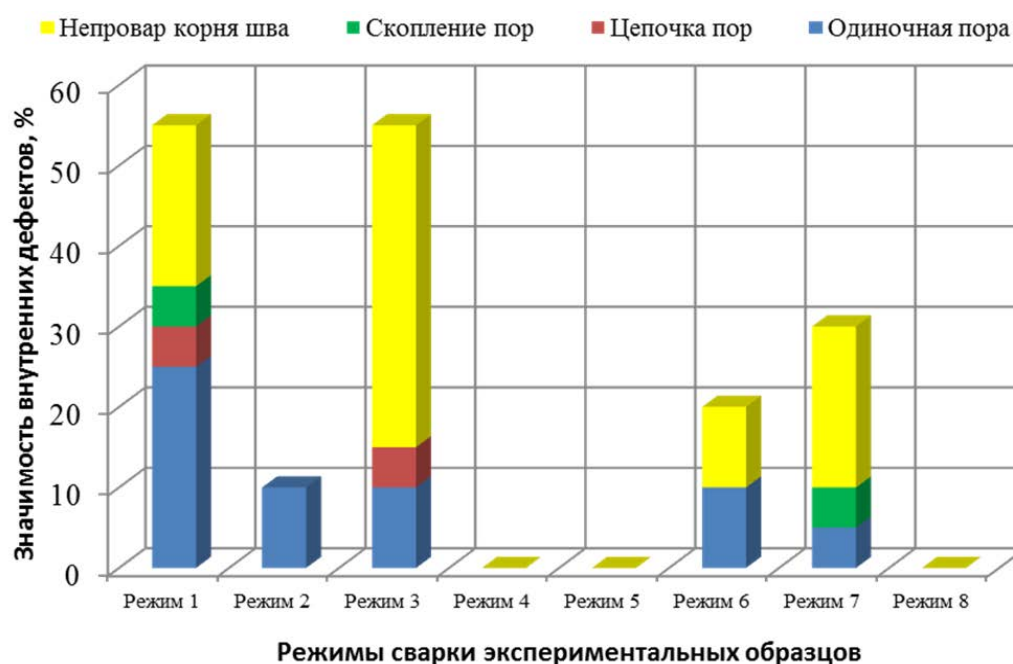


Рис. 2. Результаты рентгенотелевизионного контроля образцов, выполненных на различных режимах сварки

Из данных табл. 3 и рис. 2 видно, что оптимальными режимами сварки являются режимы с номерами 4, 5 и 8. С учетом данных визуально-измерительного контроля режимами сварки, которые обеспечивают получение бездефектных сварных швов с постоянной и стабильной геометрией сварных соединений, являются режимы 5 и 8. Наиболее неблагоприятными режимами являются режимы под номерами 1, 3 и 7, для которых вероятность возникновения внутренних дефектов превышает 25 %. Отметим также, что основными дефектами являются поры (различного вида) и непровары в корне шва. Из приведенных данных можно оценить влияние режимов сварки на вероятность возникновения внутренних дефектов. Соответственно, данные, полученные при рентгенотелевизионном контроле, подтверждают данные, полученные при визуально-оптическом осмотре:

1. Для получения бездефектного сварного шва необходима организация защиты корня шва – продувка аргоном.
2. При уменьшении угла заточки электрода снижается вероятность возникновения внутренних дефектов типа пор и непроваров в корне шва. Это объясняется увеличением проплавляющей способности дуги, а также возрастанием давления дуги на сварочную ванну, что способствует более интенсивному ее перемешиванию.

3. При увеличении силы сварочного тока вероятность возникновения внутренних дефектов типа пор и непроваров в корне шва снижается. Это также связано с повышением тепловой мощностью дуги и увеличением срока существования сварочной ванны, что способствует ее дегазации.

Результаты испытаний механических свойств

Результаты механических испытаний всех образцов представлены в табл. 4. Внешний вид ряда образцов после проведения испытаний на статическое растяжение приведен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид плоских образцов после проведения испытаний на статическое растяжение

Из данных табл. 4 видно, что неудовлетворительными режимами сварки являются режимы под номерами 1, 3 и 7. Для данных режимов прочность при статическом растяжении ниже прочности основного металла больше чем на 10 %, что недопустимо согласно нормативной документации. Прочность образцов, заваренных на остальных режимах, удовлетворяет требованиям нормативной документации, однако лишь два режима можно считать благоприятными – режимы 5 и 8, которые обеспечивают получение соединений с прочностью, эквивалентной основному металлу.

Таблица 4

Результаты испытаний на статическое растяжения плоских образцов

| Номер режима сварки | Предел прочности, МПа | Среднее значение предела прочности, МПа | Зона разрушения | Уровень прочности относительно ОМ, % | Заключение о результатах испытаний |
|---------------------|-----------------------|---|-----------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 605-634 | 620 | ОШЗ | -17,3 | Неудовлетворительный режим |
| 2 | 701-718 | 710 | ОМ | -5,33 | Удовлетворительный режим |
| 3 | 624-652 | 638 | ОШЗ | -14,93 | Неудовлетворительный режим |
| 4 | 695-704 | 700 | ОМ | -6,67 | Удовлетворительный режим |
| 5 | 715-738 | 727 | ОМ | -3,07 | Удовлетворительный режим |
| 6 | 662-707 | 685 | ОМ | -8,67 | Удовлетворительный режим |
| 7 | 633-684 | 659 | ОМ | -12,13 | Неудовлетворительный режим |
| 8 | 754-783 | 767 | ОМ | +2,27 | Удовлетворительный режим |

Примечания: 1. ОШЗ – околошовная зона; ОМ – основной металл.

2. Прочность при растяжении для ОМ определена экспериментально и составляет 750 МПа



Общие выводы по результатам исследований

1. Результаты статистики дефектов сварного авиационного трубопровода из нержавеющей стали показывают, что достаточно большое количество деталей требует доработки. За период с 2011 по 2015 гг. средний процент деталей, требующих доработки после первого предъявления, составляет 32,51 %. Данные статистики также показывают, что основную массу дефектов при изготовлении сварных стальных нержавеющих трубопроводов составляют непровары в корне шва (более 38 % от общего числа дефектов) и поры как единичного, так и группового характера (более 34 % от общего числа дефектов).

2. Анализ причин возникновения наиболее вероятных дефектов при сварке стального нержавеющего авиационного трубопровода, а также базового технологического процесса, используемого на рассматриваемом предприятии, показывает, что характер их возникновения носит в большей степени технологический характер и связан с некорректными режимами сварки или несоблюдением правил и требований выполнения сварных соединений. Для снижения вероятности возникновения дефектов необходимо оптимизировать режимы ручной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки неповоротных стыков труб.

3. Анализ основных параметров режима ручной аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом с подачей присадочной проволоки позволил определить основные параметры, оказывающие влияние на качество получаемого соединения. Такими параметрами являются: сила сварочного тока, угол заточки вольфрамового электрода и наличие или отсутствие защиты корня шва.

4. Комплексное исследование качества сварных соединений (визуально-измерительный контроль, рентгенотелевизионная дефектоскопия, испытания на статическое растяжение), выполненных на различных режимах, позволило определить характер влияния ряда параметров процесса ручной аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом на качество получаемого соединения:

- Для получения качественного сварного соединения обязательна организация защиты корня шва аргоном. При отсутствии защиты вероятность возникновения внутренних дефектов, даже при корректном значении других параметров процесса, составляет 55 %, что недопустимо. Кроме того, идет процесс сильного окисления поверхности корня шва, вследствие чего он имеет неудовлетворительный внешний вид и шероховатость. Прочность при статическом растяжении сварного шва, выполненного без защиты корня шва, также не удовлетворительна и более чем на 17 % ниже, чем для основного металла.

- Изменение величины угла заточки электрода оказывает несущественное влияние на формирование геометрических параметров сварного соединения при прочих равных параметрах. Однако при увеличении силы сварочного тока значение угла заточки электрода оказывает более интенсивное воздействие на геометрические характеристики сварного соединения. Общие тенденции влияния данного параметра следующие: при уменьшении угла заточки электрода увеличивается проплавливающая способность дуги, это связано с повышением степени концентрации дуги, и, как следствие, повышением ее тепловой мощности, в результате существенно увеличиваются ширина и высота корня шва, ширина усиления практически не изменяется, высота усиления уменьшается. Влияние угла заточки электрода на вероятность возникновения внутренних дефектов носит следующий характер: при уменьшении угла заточки электрода снижается вероятность возникновения дефектов. Это объясняется увеличением проплавливающей способности дуги, а также возрастанием давления дуги на сварочную ванну, что способствует более интенсивному ее перемешиванию и лучшей дегазации. На механические свойства получаемого сварного соединения угол заточки неплавящегося электрода оказывает косвенное влияние за счет изменения характеристик дугового разряда (концентрации дуги, тепловой эффективности дуги).

- Сила сварочного тока оказывает существенное влияние на качество получаемого сварного соединения. С увеличением данного параметра повышается стабильность процесса горения дуги, геометрические параметры сварного соединения изменяются следующим образом: существенно увеличиваются высота и ширина корня шва, незначительно увеличивается ширина усиления, вы-

сота усиления увеличивается незначительно, но при малой толщине свариваемых деталей увеличение силы сварочного тока может приводить к уменьшению высоты усиления и даже образованию вогнутости усиления. Несмотря на увеличение общей стабильности процесса горения дуги с увеличением силы сварочного тока повышается вероятность получения сварного шва с нестабильной геометрией по длине. Это объясняется повышением влияния колебаний длины дуги (при ручной дуговой сварке данный параметр в первую очередь определяется квалификацией сварщика) на геометрические параметры сварного соединения с увеличением силы сварочного тока. На вероятность образования пор и непроваров в корне шва увеличение силы сварочного тока оказывает следующее влияние: при увеличении силы сварочного тока вероятность возникновения пор и непроваров в корне шва снижается. Это связано с повышением тепловой мощности дуги и увеличением срока существования сварочной ванны, что способствует ее дегазации. Влияние изменения силы сварочного тока на механические свойства соединения, как и в случае с углом заточки вольфрамового электрода, носит косвенный характер.

5. На основании комплексного анализа качества сварных соединений, выполненных на различных режимах сварки, определен наиболее благоприятный режим ручной аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом с подачей присадочной проволоки неповоротных стыков труб из нержавеющей стали авиационного назначения. Оптимальным можно считать режим со следующим значением основных параметров процесса сварки: диаметр вольфрамового электрода – 2 мм, диаметр присадочной проволоки – 1,6 мм, сила сварочного тока – 68-72 А; напряжение на дуге – 12-14 В; скорость сварки – 6-8 м/ч; угол заточки вольфрамового электрода – 55°; расход защитного газа через горелку – 8-10 л/мин; защита корня шва обязательна, при этом расход аргона для осуществления защиты должен составлять не менее 6-8 л/мин; сварку необходимо вести на постоянном токе прямой полярности. При данном значении параметров режима сварки сварное соединение:

- имеет стабильные геометрические характеристики на всей протяженности, удовлетворяющие требованиям нормативной документации;
- не имеет внутренних дефектов типа пор и непроваров в корне шва;
- обладает прочностью при статическом растяжении, эквивалентной основному металлу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сварка в самолетостроении / под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 2008. – 581 с.
2. Щекин, В. А. Технологические основы сварки плавлением: учеб. пособие / В. А. Щекин. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 345 с.
3. Сварочные материалы для дуговой сварки: справ. пособие. В 2 т. Т. 1 / под ред. Н. Н. Патапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.
4. Овчинников, В. В. Дефекты сварных соединений / В. В. Овчинников. – М.: Академия, 2008. – 63 с.



Марьин Б. Н., Куриный В. В., Пхон Хтет Кьяв, Мин Ко Хлайнг
V. N. Maryin, V.V. Kurinyi, Phone Htet Kyaw, Min Ko Hlaing

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП ТОЧНОСТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНТАЖНЫХ
ЗАГОТОВОК ТРУБОПРОВОДОВ С РАЗЪЕМНЫМИ И НЕРАЗЪЕМНЫМИ
СОЕДИНЕНИЯМИ**

**DETERMINATION OF ACCURACY GROUPS FOR MANUFACTURING PIPELINE PARTS
WITH SEPARABLE AND FIXED JOINTS**

Марьин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)177-87-55. E- mail: mariynsb@mail.ru.

Mr. Boris N. Maryin – Dr. of Engineering, Professor, Mechanical Engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7 (914) 1778755. E-mail: mariynsb@knastu.ru.

Куриный Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Mr. Vladislav V. Kurinyi – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Пхон Хтет Кьяв – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Phone Htet Kyaw – a Postgraduate Student, Materials and Technology of New Materials Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Мин Ко Хлайнг– аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Min Ko Hlaing – a Postgraduate Student, Materials and Technology of New Materials Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос снижения монтажных напряжений в разъемных и неразъемных соединениях монтажных заготовок в зависимости от жесткостных характеристик. Рассмотрены методы достижения требуемой точности монтажных заготовок. Отмечено, что требуемая точность монтажных заготовок в процессе их сборки достигается при помощи размерных технологических цепей. Приведены размерный анализ заготовки, выбор вида и формы организации сборочного процесса. Проанализированы последовательность сборки изделия и схема сборки. Отмечено, что она подразделяется на две основные части: узловую и окончательную сборки. Приведены особенности проверки прочности и герметичности гидрогазовых систем. Указанно, что следует учитывать компенсационные возможности как самой трубы, так и соединений концов трубы. В данной работе определяются группы точности для изготовления монтажных заготовок трубопроводов с разъемными и неразъемными соединениями. Рассмотрены схемные решения для проверки прочности и герметичности монтажных заготовок.

Summary. The article discusses the misalignment of mounting voltages in separable and fixed joints of mounting blanks, depending on the stiffness characteristics. Methods for achieving the required accuracy of assembly blanks are considered. It is noted that the required accuracy of assembly blanks in the process of their assembly is achieved by means of dimensional technological chains. A dimensional analysis of the part has been done. The choice of the type and form of the organization of the assembly process is given. The sequence of assembly of the product and the assembly scheme are analyzed. It is noted that it is divided into two main parts of the node and final assembly. Specifics of checking the strength and tightness of the hydro-gas systems are given. It is indicated that it is necessary to take into account the compensatory capabilities of both the pipe itself and the joints of the pipe ends. In this paper, accuracy groups are determined for the manufacture of assembly blanks of pipelines with separable and fixed joints. Schematic solutions for testing the strength and tightness of assembly blanks are considered.

Ключевые слова: монтажные заготовки, разъемные и неразъемные соединения, монтажные напряжения, прочность, герметичность.

Key words: the mounting of the parts, separable and fixed joints, the mounting tension, strength, tightness.

УДК 744.4

Трубопроводы кроме эксплуатационных нагрузок (давления, вибрации, температуры и др.) испытывают дополнительные нагрузки за счет монтажных напряжений. Монтажные напряжения возникают в результате производных отклонений от норм точности изготовления монтажных заготовок, а также точности расположения мест их установки (от деформации конструкции) [1].

Монтажные напряжения, возникающие при установке труб на изделия, характеризуются производственными отклонениями по длине в зоне сопряжения со штуцером и эксцентриситетом между осями трубы и штуцера [2].

С целью снижения монтажных напряжений в разъемных и неразъемных соединениях монтажных заготовок в зависимости от жесткостных характеристик следует учитывать компенсационные возможности как самой трубы (материал, длина, конфигурация, толщина стенки и т.п.), так и соединений концов трубы (фланцевое, ниппельное, дюритовое и т.п.).

Исследования показали, что каждая группа точности характеризуется определенными требованиями, предъявляемыми к трубопроводам при их изготовлении и монтаже.

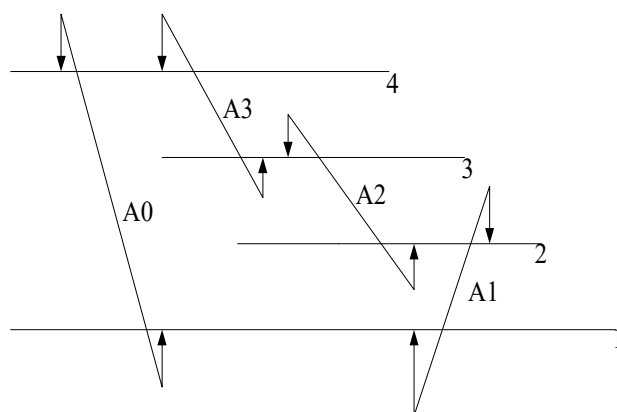
1. Методы достижения требуемой точности монтажных заготовок

Требуемая точность монтажных заготовок в процессе их сборки достигается при помощи размерных технологических цепей. Идентичности размерной технологической цепи с конструкторской возможно достичь при помощи одного из методов взаимозаменяемости точности исходного звена.

Выбору методов достижения требуемой точности монтажных заготовок обычно предшествует изучение рабочих чертежей. Изучение чертежей начинают с момента ознакомления с конструкцией и выявления их исполнительных поверхностей и углубляют при решении дальнейших этапов технологического процесса сборки гидрогазовых систем (ГГС).

1.1. Размерный анализ.

Основным требованием к ГГС является плавная (без заклинивания) сборка монтажных заготовок. Для установления норм точности деталей, входящих в ГГС, составляем размерную цепь (см. рис. 1).



1 – ось отверстия штуцера; 2 – ось наружной поверхности трубы; 3 – ось внутренней поверхности штуцера; 4 – ось наружной поверхности конуса

Рис. 1. Размерная цепь

1.2. Решение размерных цепей.

Известно, что наименьшая трудоемкость сборочных работ достигается использованием методов взаимозаменяемости. В этом случае процесс сборки заключается в простом присоединении деталей друг к другу. На основе выявленных, построенных и рассчитанных размерных цепей установлены нормы точности на каждую деталь монтажных заготовок. При расчете размерных цепей с числом звеньев более трех для достижения точности за основу принимают метод неполной взаимозаменяемости с использованием вероятностного расчета.

Допуск размерной цепи, определяющий параллельность оси трубы и оси штуцера, не более 0,5 мм. Допуск $A_0 = 0,5$ мм.

При изготовлении изделий в мелкосерийном производстве применяется метод неполной взаимозаменяемости.

Определяем средний допуск любого составляющего звена при неполной взаимозаменяемости по формуле

$$T_{\text{Аср}} = \frac{TA_0}{1,2\sqrt{m-1}},$$

где $m = 8$ – общее число звеньев;

$$T_{\text{Аср}} = \frac{0,5}{1,2\sqrt{8-1}} = 0,157.$$

Определяем средний допуск любого составляющего звена при полной взаимозаменяемости по формуле

$$T_{\text{Аср}} = \frac{TA_0}{m-1}; \quad T_{\text{Аср}} = \frac{0,5}{8-1} = 0,07.$$

Из вышеизложенного анализа следует, что необходимую точность всех параметров изделия надо обеспечить методом неполной взаимозаменяемости. Сборка этим методом целесообразна для многозвенных цепей при серийном и массовом производстве.

Преимущества – более широкие допуски на размер составных звеньев, чем при расчете методом полной взаимозаменяемости.

Недостатки – необходимость контроля 100 % изделий, обнаруженный брак разбирают и собирают в другой комбинации.

2. Выбор вида и формы организации сборочного процесса

Последовательность общей сборки определяется конструктивными особенностями и методами получения требуемой точности ГГС. При мелкосерийном производстве целесообразно расчленить процесс сборки на ряд сборочных операций, которые представлены в виде схемы сборки.

Вид сборки (см. рис. 2) определяют сочетанием признаков. Для данной сборочной единицы, которая является узлом, эти признаки будут следующими:

1. объект сборки – общая сборка;
2. стадия сборки – окончательная;
3. форма организации сборки – групповая непоточная;
4. последовательность сборки – последовательная;
5. подвижность объекта сборки – неподвижная;
6. механизация и автоматизация сборки – механизированная.

Выбранный технологический процесс сборки должен обеспечивать повышение производительности сборки и качество изделия.

3. Разработка последовательности сборки изделия и схемы сборки

Технологическим процессом сборки называется процесс последовательного соединения деталей в узлы, а узлы и деталей – в ГГС.

Он подразделяется на две основные части:

1. процесс узловой сборки, когда из деталей собираются подгруппы (узлы) и группы;
2. процесс окончательной сборки, когда из групп (узлов) и отдельных деталей собирается готовое изделие.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП ТОЧНОСТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНТАЖНЫХ ЗАГОТОВОК ТРУБОПРОВОДОВ С РАЗЪЕМНЫМИ И НЕРАЗЪЕМНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

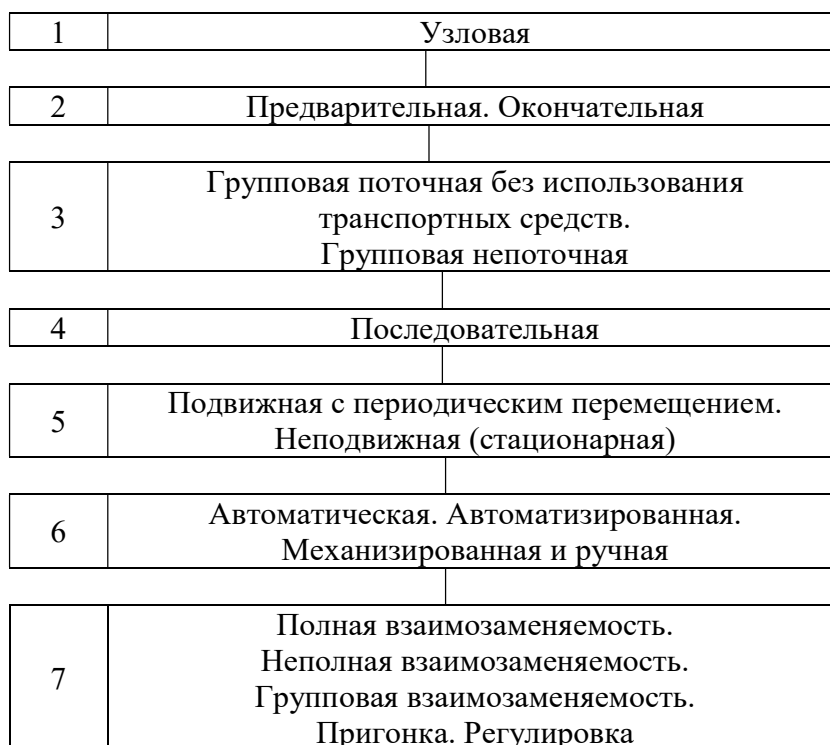


Рис. 2. Вид сборки

Цели: определить сборочные единицы и детали, составляющие изделие; наметить последовательность общей сборки изделия, сборки сборочных единиц, входящих в изделие, а также последовательность установки отдельных деталей.

Сборку начинаем с базовой детали. Принимаем за базовую деталь штуцер.

Рассмотрим процесс сборки ГГС. Пользуясь сборочным чертежом (см. рис. 3), описываем порядок выполнения сборки:

- устанавливаем базовые штуцера и гидроагрегаты на изделия;
- устанавливаем на изделия магистральные трубопроводы;
- устанавливаем на изделия трубопроводы;
- производим крепление трубопроводов;
- накручиваем гайки на штуцера;
- производим контрольку гаек на штуцерах.

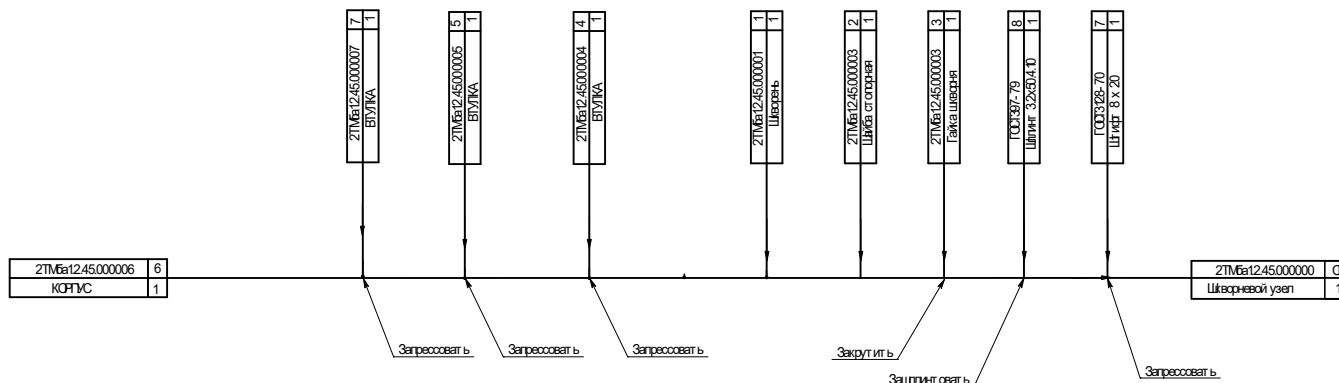


Рис. 3. Сборочный чертеж

Группа точности на монтажные заготовки определяется конструктором и указывается в чертеже по результатам исследований, указанных в табл. 1 – 3.



Для соединений трубопроводов по наружному конусу требования установлены в ГОСТ 13954-74 – ГОСТ 13977-74, ОСТ 1.12051-75, ОСТ 1.00770-75, группа точности приведена в табл. 1.

Для соединений трубопроводов с облегченным соединением с упругим врезающимся элементом – ниппелем, имеющим хвостовик (ОСТ 1.00879-77), группа точности представлена в табл. 2.

Для неразъемных соединений трубопроводов (ОСТ 1.00801-76 и ОСТ 1.00961-80) группа точности представлена в табл. 3.

Таблица 1

Группа точности трубопроводов по наружному конусу

| Группа точности | Материал трубы | Длина заготовки трубы, мм | Наружный диаметр трубы, мм | Виды соединений |
|-----------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| I | Сталь и титановые сплавы | <500 | 6 | ГОСТ 13954-74 – ГОСТ 13977-74; ОСТ 1.12051-75; ОСТ 1.00770-75 |
| | | <750 | 8 | |
| | | <1000 | 10 | |
| | | <1500 | 12 | |
| | | <2000 | 14 | |
| <2500 | 20 | | | |
| Все длины | >20 | | | |
| | Алюминиевые и медные сплавы | <250 | 8 | ГОСТ 13954-74 – ГОСТ 13977-74; ОСТ 1.12051-75; ОСТ 1.00770-75 |
| | | <750 | 10 | |
| | | <1000 | 12 | |
| | | <1500 | 14 | |
| | | <2000 | 20 | |
| Все длины | Свыше 20 | | | |
| | Сталь и титановые сплавы | <500 Все длины | 6...8 С 10 и выше | Сварное и паяное |
| | Алюминиевые и медные сплавы | Все длины | С 10 и выше | Сварное и паяное |
| II | Сталь и титановые сплавы | 751...1250 | 8 | ГОСТ 13954-74 – ГОСТ 13977-74; ОСТ 1.12051-75; ОСТ 1.00770-75 |
| | | 1001...1500 | 10 | |
| | | 1501...2000 | 12 | |
| | | >2500 | 14 | |
| | | | 20 | |
| | Алюминиевые и медные сплавы | 251...500 | 8 | ГОСТ 13954-74 – ГОСТ 13977-74; ОСТ 1.12051-75; ОСТ 1.00770-75 |
| | | 751...1000 | 10 | |
| | | 1001...1250 | 12 | |
| | | 1501...2000 | 14 | |
| | | >2000 | 20 | |
| | Независимо от марки материала | Все длины | Свыше 10 | ОСТ 1.14079-81 и телескопическое |
| | Сталь и титановые сплавы | >500 | 6...8 | Сварное и паяное |

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП ТОЧНОСТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНТАЖНЫХ ЗАГОТОВОК ТРУБОПРОВОДОВ С РАЗЪЕМНЫМИ И НЕРАЗЪЕМНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

Продолжение табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----|-------------------------------|--|--------------------------|---|
| III | Сталь и титановые сплавы | >500 >1250 >1500 >2000 >2500 | 6 8 10 12 14 | ГОСТ 13954-74 – ГОСТ 13977-74; ОСТ 1.12051-75; ОСТ 1.00770-75 |
| | Алюминиевые и медные сплавы | Все длины >500 >1000 >1250 >2000 | 6 8 10 12 14 | ГОСТ 13954-74 – ГОСТ 13977-74; ОСТ 1.12051-75; ОСТ 1.00770-75 |
| | Сталь и титановые сплавы | Все длины | До 6 | Сварное и паяное |
| | Алюминиевые и медные сплавы | Все длины | До 8 включительно | Сварное и паяное |
| | Независимо от марки материала | Все длины | До 8 включительно | ОСТ 1.14079-81 и телескопическое |

Таблица 2

Группа точности трубопроводов с облегченным соединением с упругим врезающимся элементом – ниппелем

| Группа точности | Марка материала трубы | Длина заготовок трубы, мм | Наружный диаметр трубы, мм |
|-----------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| I | 12X18H10T, ПТ-7М, ОТЧ-0 | <50 | 6 |
| | | <1000 | 8 |
| | | <1500 | 10 |
| | | <2000 | 12 |
| | | Все длины | 14 и выше |
| II | | 751...1250 | 6 |
| | | 1001...1500 | 8 |
| | | >1500 | 10 |
| | | >2000 | 12 |
| III | | >1250 | 6 |
| | | >1500 | 8 |

К первой группе точности рекомендуется относить трубы, которые при сочетании длин и диаметров, указанных в табл. 3, имеют:

1. с двух сторон жесткозакрепленные точки подсоединения при следующем сочетании соединений:

- неразъемные (паяное) – разъемные (ниппельные);
- неразъемные (паяное) – неразъемные (паяное);

2. с одной стороны жесткозакрепленную точку при следующем сочетании соединений:

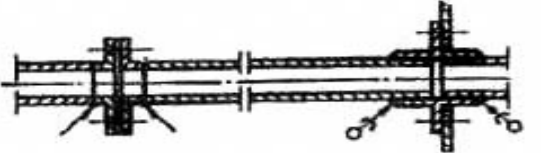
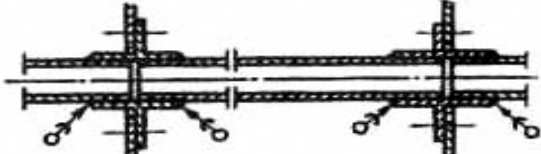
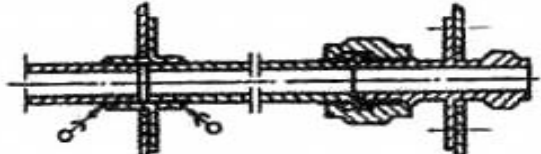
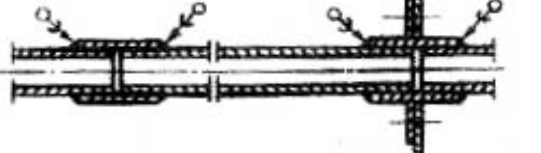
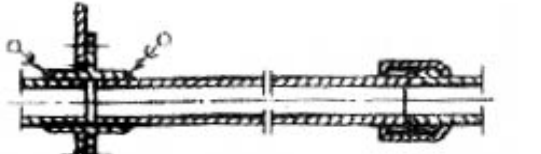
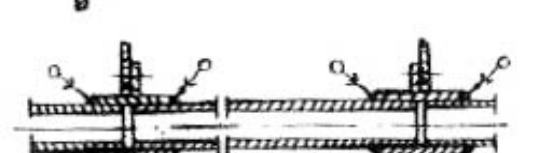
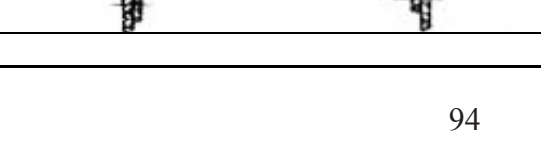
- неразъемные (паяное) – разъемные (фланцевые);
- неразъемные (паяное) – неразъемные (паяное, ТМС);
- неразъемные (паяное) – разъемные (ниппельные).

Ко второй группе точности рекомендуется относить трубы (см. табл. 3), имеющие:

1. с двух сторон жесткозакрепленные точки подсоединения при следующем сочетании соединений:
 - неразъемные (паяное) – неразъемные (паяное);
 - неразъемные (паяное) – разъемные (ниппельные);
2. с одной стороны жесткозакрепленную точку подсоединения при следующем сочетании соединений:
 - неразъемные (паяное) – разъемные (ниппельное);
 - неразъемные (паяное) – неразъемные (паяное, ТМС);
3. с двух сторон незакрепленные точки подсоединения при следующем сочетании соединений:
 - неразъемные (паяное, ТМС) – разъемные (ниппельные);
 - неразъемные (паяное, ТМС) – неразъемное (паяное, ТМС).

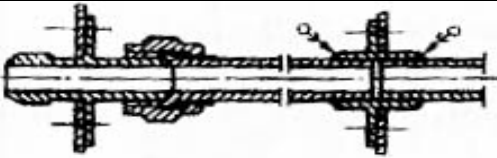
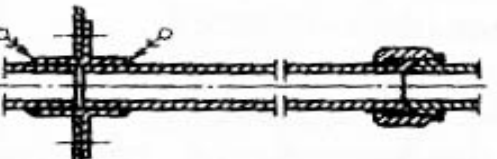
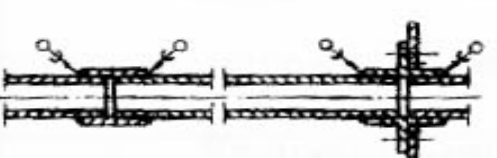
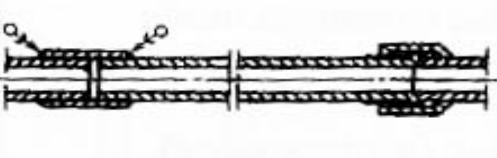
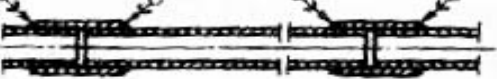
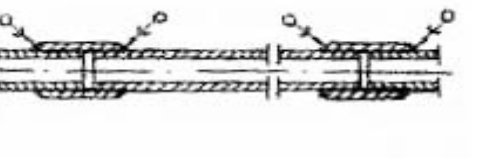

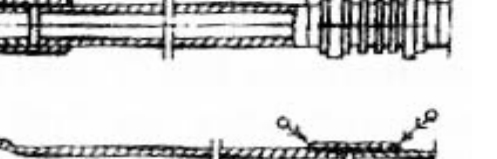
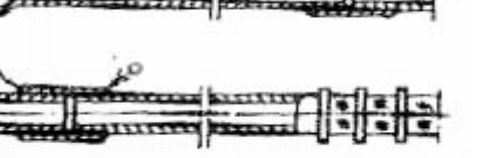
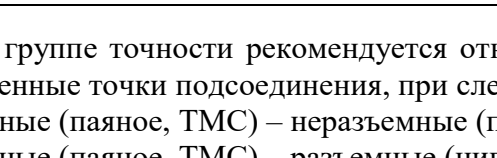
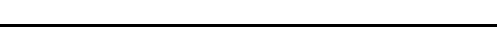
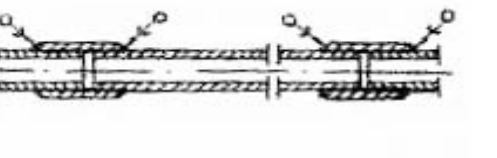

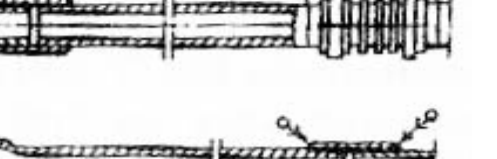
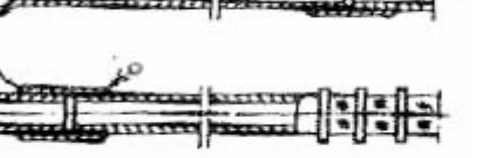
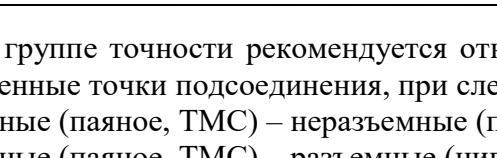
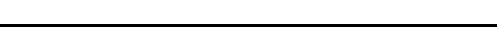
Таблица 3

Группа точности неразъемных соединений трубопроводов

| Номер группы точности | Эскиз | Длина трубы, мм | Наружный диаметр трубы, мм |
|-----------------------|---|-----------------|----------------------------|
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| I |  | <750 | 6 |
| |  | <1250 | 8 |
| |  | <1500 | 10 |
| |  | <2000 | 12 |
| |  | <2500 | 14 |
| |  | >2500 | >14 до 20 |
| |  | Все длины | >20 |

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП ТОЧНОСТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНТАЖНЫХ ЗАГОТОВОК ТРУБОПРОВОДОВ С РАЗЪЕМНЫМИ И НЕРАЗЪЕМНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

Продолжение табл. 3

| I | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|--------------|
| II |  | >750 | 6 |
| |  | >1250 | 8 |
| |  | >1500 | 10 |
| |  | >2000 | 12 |
| |  | >2500 | 14 |
| |  | <750 | 6 |
| |  | <1250 | 8 |
| |  | <1500 | 10 |
| |  | <2000 | 12 |
| |  | <2500 | 14 |
| |  | >2500 | >14 до 20 |
| | III |  | Все длины |
|  | >750 | 6 | |
|  | >1250 | 8 | |
|  | >1500 | 10 | |
|  | >2000 | 12 | |
|  | >2500 | 14 | |
| | | Все диаметры | Все диаметры |

К третьей группе точности рекомендуется относить трубы (см. табл. 3), имеющие с двух сторон незакрепленные точки подсоединения, при следующем сочетании соединений:

- неразъемные (паяное, ТМС) – неразъемные (паяное, ТМС);
- неразъемные (паяное, ТМС) – разъемные (ниппельные);



- неразъемные (паяное, ТМС) – разъемные (сильфон, дюритовое, фторопластовый рукав, шланг и др.).

Основным определяющим фактором классификации монтажных заготовок на группы точности является вид их соединения (ОСТ 1.41277-72).

Монтажные заготовки рекомендуется классифицировать на три группы точности (I, II, III), которые приведены в табл. 4.

Коллекторы относятся к первой группе точности (см. табл. 5).

4. Проверка прочности и герметичности гидрогазовых систем

Для оценки качества изготовления деталей из монтажных заготовок необходимо проводить проверку на герметичность и прочность.

При испытании на герметичность необходимо определить соответствие деталей требованиям непроницаемости для рабочих жидкостей или газов.

При испытаниях на прочность необходимо определить соответствие проверяемых деталей установленным требованиям по прочности.

Проверка на прочность и контроль герметичности проводятся для всех монтажных заготовок в соответствии с указаниями, приведенными в чертежах или технических условиях.

Испытания и исследование монтажных заготовок на прочность производятся опрессовкой жидкостью (масло АМГ-10, силиконовые жидкости, эмульсия, вода с хромпиком, дистиллированная вода и др.).

Если давление опрессовки при испытании на прочность меньше 2,0 МПа (20 кгс/см^2), то, как исключение, допускается проводить испытание монтажных заготовок на прочность опрессовкой воздухом в ванне с водой или другой прозрачной жидкостью, находящейся в защитном устройстве.

Испытания монтажных заготовок на герметичность рекомендуется производить средой, вязкость которой ниже, чем вязкость рабочей среды.

Контрольные среды (жидкость, газ или смесь газов), применяемые при испытании деталей всех систем, должны быть инертными к материалам и покрытиям деталей.

Контроль герметичности труб кислородной системы следует проводить воздухом, азотом или гелием, обращая особое внимание на чистоту поверхностей труб.

При проверке труб на герметичность, когда контрольной средой является газ, необходимо предусматривать меры предотвращения взрыва.

Для сокращения трудоемкости испытания монтажных заготовок с использованием рабочей жидкости разрешается совмещать операции проверки на прочность и герметичность с одного подключения, при этом проверку герметичности следует производить при избыточном испытательном давлении, указанном в чертеже или технических условиях.

Детали из монтажных заготовок, их соединения считаются прочными и герметичными, если они удовлетворяют техническим условиям при их испытаниях на прочность и герметичность.

Поверхность деталей из монтажных заготовок должна иметь доступ для визуального осмотра при проведении их испытаний на прочность и герметичность.

Испытания на прочность и контроль герметичности должны проводиться в строгом соответствии с действующими правилами техники безопасности.

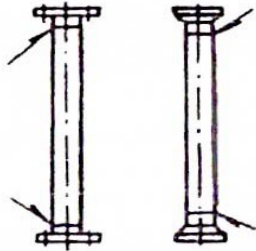
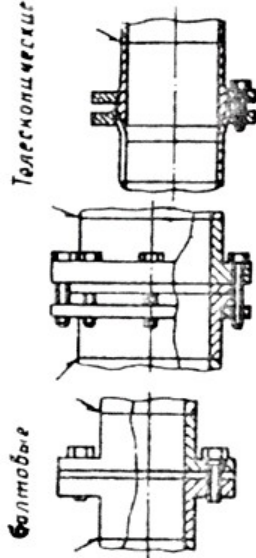
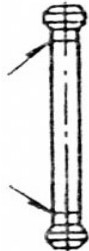
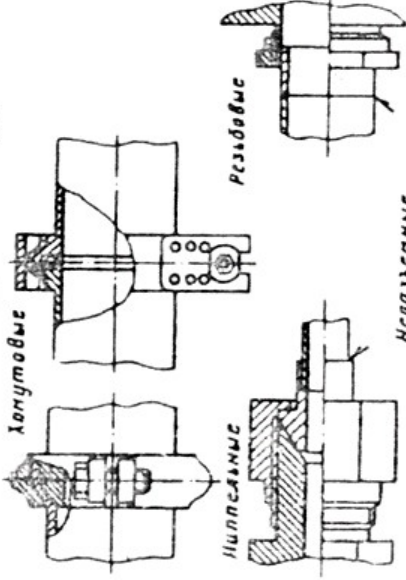
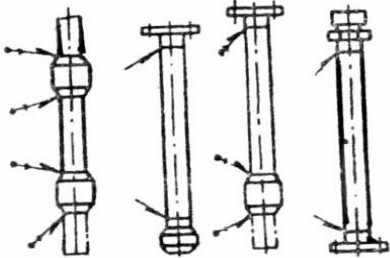
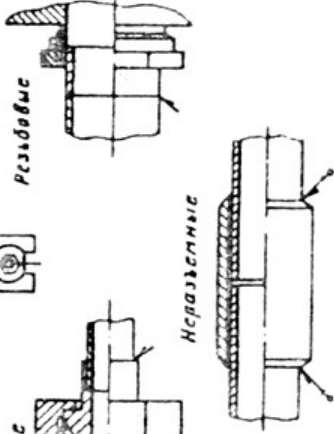
Кроме испытаний на прочность и герметичность, периодически (по указанию ОКБ) проводятся гидравлические испытания на разрушение образцов длиной 200...300 мм и изготовленных монтажных заготовок. Эти испытания проводятся для оценки качества поставки полуфабрикатов и стабильности соблюдения технологического процесса по параметрам, которые не могут быть проверены при серийных испытаниях.

Проверка прочности монтажных заготовок проводится испытанием их на разрушение внутренним гидравлическим давлением. Перечень монтажных заготовок, подлежащих испытанию на разрушение, задается конструктором; периодичность проверки на разрушение – не реже одного раза в полгода.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП ТОЧНОСТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНТАЖНЫХ ЗАГОТОВОК ТРУБОПРОВОДОВ С РАЗЪЕМНЫМИ И НЕРАЗЪЕМНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

Таблица 4

Группы точности монтажных заготовок

| Группа точности | Определение принадлежности монтажные заготовки к группе точности | Эскиз монтажных заготовок | Вид соединения |
|-----------------|--|---|--|
| I | Монтажные заготовки, имеющие с двух концов фланцевые соединения |  |  |
| | Монтажные заготовки, имеющие с двух концов резьбовые нищельные или безнищельные соединения |  |  |
| | Монтажные заготовки, имеющие на концах сочетание неподвижных соединений |  |  |

Продолжение табл. 4


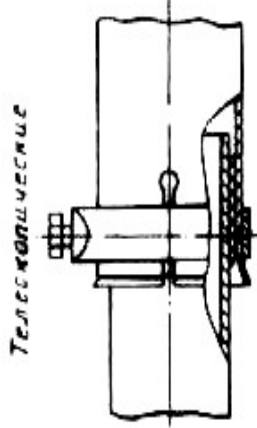
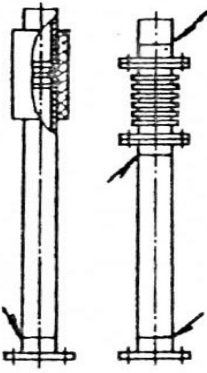
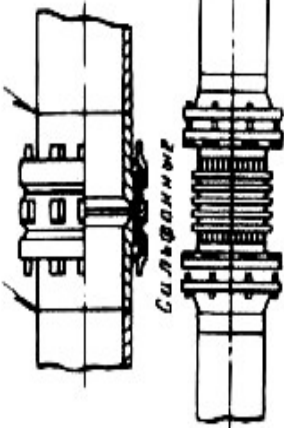








| Группа точности | Определение принадлежности монтажные заготовки к группе точности | Эскиз монтажных заготовок | Вид соединения |
|-----------------|--|--|---|
| II | Монтажные заготовки, имеющие с одного конца неподвижное, а с другого подвижные (перемещение по длине) соединения |  |  |
| | Монтажные заготовки, имеющие с одного конца неподвижное (фланцевое, шпильное, резьбовое, неразъемное), а с другого – подвижные (компенсатор по длине и несоосности) соединения |  |  |
| III | Монтажные заготовки, имеющие один приварной конец к планеру или агрегату систем, а на других концах – подвижные или неподвижные соединения |  |  |
| | Монтажные заготовки, имеющие подвижное соединение со всех концов |  |  |
| III | Монтажные заготовки, имеющие соединения любого вида только с одного конца |  |  |
| | Монтажные заготовки, являющиеся кожухами для размещения в них электросети или тросов |  |  |

Таблица 5

Группа точности коллекторов

| Группа точности | Вид ответвления | Эскиз коллектора |
|-----------------|--------------------------|------------------|
| I | Труба | |
| | Нормализованные элементы | |
| | Штамповка | |
| | Штампованный тройник | |

Испытания на разрушение проводятся в такой последовательности:

1. Определяется давление испытаний:

- для деталей из стальных, алюминиевых и титановых сплавов:

$$p = \frac{200S_{\min} [\sigma]_{\text{доп}}}{d_y},$$

- для деталей из медных сплавов:

$$p = \frac{1100S_{\min}}{d_y},$$

где S_{\min} – минимальная толщина стенки, мм; d_y – внутренний диаметр, мм; $[\sigma]_{\text{доп}}$ – допускаемое напряжение, равное 40 % от временного сопротивления разрыву, Па (кгс/мм²).

2. При полученном значении давления монтажные заготовки выдерживаются в течение 5 мин или в соответствии с нормой завода-поставщика.

3. Давление плавно повышается до значения, при котором монтажные заготовки разрешаются.

Монтажные заготовки считаются выдержавшими испытание, если при проверке они не имели следов «отпотевания», вспучивания и трещин, а разрушающее давление было не ниже 3,15 кратного рабочего давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование совмещенных процессов при изготовлении деталей летательных аппаратов / Б. Н. Марьин, С. И. Феоктистов, Д. Г. Колыхалов, В. В. Куриный, И. Н. Иванов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2016. – № II-1(26). – С. 34-41.
 2. Марьин, Б. Н. Изготовление трубопроводов гидрогазовых систем летательных аппаратов / Б. Н. Марьин. – М.: Машиностроение, 1988. – С. 64-75.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

Сысоев О. Е., Добрышкин А. Ю., Нейн С. Н.
O. Ye. Sysoyev, A. Yu. Dobryshkin, S. N. Nyain

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ НА ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ РАЗОМКНУТЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д19

THE EFFECT OF THE ADDED MASS FLUCTUATIONS ON FORCED OPEN SHELLS FROM ALUMINUM ALLOYS

Сысоев Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, декан факультета кадастра и строительства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fks@knastu.ru.

Mr. Oleg Ye. Sysoyev – D.Sc. in Engineering, Professor, Dean of Cadastre and Civil Engineering Faculty; Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: fks@knastu.ru.

Добрышкин Артем Юрьевич – старший преподаватель кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Mr. Artem Yu. Dobryshkin – Senior Lecturer, Civil Engineering and Architecture Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Нейн Сит Ньянг – аспирант кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Mr. Nyein Sit Naing – a post-graduate student, Civil Engineering and Architecture Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Аннотация. Тонкостенные шарнирно опертые оболочки широко используются при строительстве зданий и сооружений. Оболочки из легких алюминиевых сплавов являются эффективной заменой железобетонным и стальным конструкциям, обладающим большой массой, от изменения материалов конструкций меняются параметры собственных и вынужденных колебаний конструкций. Соответствие теоретических расчетов и реального поведения конструкций из алюминиевых сплавов обеспечивает их безаварийную работу. В лаборатории «Строительные конструкции» на базе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (КНАГУ) был проведен эксперимент по определению влияния величины присоединенной массы на собственные колебания пологих цилиндрических оболочек из алюминиевых сплавов, результаты масштабированных экспериментов были сопоставлены с теоретическими расчетами. Целью проведенного эксперимента является измерение вынужденных колебаний разомкнутой пологой цилиндрической оболочки при пошаговом повышении величины присоединенной массы. Колебания разомкнутой пологой тонкостенной цилиндрической оболочки, прямоугольной в плане, измерялись с помощью индукционных акселерометров. Образец был подвержен колебаниям с присоединенной массой, связанной соотношением $M/M_0 = 3$, и без неё. Расчет оболочки производился на основании общего уравнения колебаний оболочки с использованием уравнений, выведенных Доннела – Муштари – Власовым. В статье представлены аналитические и экспериментальные зависимости между частотой колебаний оболочки и величиной присоединенной массы из алюминиевого сплава Д19. Выявлено несоответствие расчетных и экспериментальных данных, их расхождение растет с увеличением присоединенной массы. Отклонение теоретических расчетов колебаний оболочки с присоединенной массой от реального поведения алюминиевых конструкций требует введения дополнительных запасов прочности, в противном случае может привести к внезапной потере устойчивости и разрушению зданий и сооружений.

Summary. Thin-walled articulated casings are widely used in the construction of buildings and structures. Shells made of light aluminum alloys are an effective substitute for reinforced concrete and steel structures that have a large mass, and the parameters of their own and forced oscillations of structures change depending on structure materials. The correspondence of theoretical calculations and the actual behavior of aluminum alloy structures

ensures their trouble-free operation. In Komsomolsk-on-Amur State University (KnASU), an experiment was conducted in the laboratory «Building Constructions» to determine the influence of the value of the attached mass on the natural oscillations of shallow cylindrical shells of aluminum alloys, the results of scaled experiments were compared with theoretical calculations. The purpose of the experiment is to measure the forced oscillations of an open, shallow cylindrical shell with a systematic increase in the value of the attached mass. Oscillations of an open, shallow, thin-walled cylindrical shell, rectangular in plan, were measured using induction accelerometers. The sample was subjected to vibrations, with a mass attached by a bound $M / M_0 = 3$ ratio and without it. The shell was calculated on the basis of the general equation of shell oscillations, using the equations derived by Donnel-Mushtari-Vlasov. The article presents analytical and experimental dependences between the vibration frequency of the shell and the value of the attached mass of aluminum alloy D19. The discrepancy between the calculated and experimental data is revealed, their discrepancy increases with the increase in the added mass. The deviation of the theoretical calculations of shell vibrations with the attached mass, from the real behavior of aluminum structures requires the introduction of additional strength reserves, or can lead to a sudden loss of stability and the destruction of buildings and structures.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, пологая оболочка, нелинейные колебания, модель устойчивости, присоединенная масса, датчики, напряжения, частота.

Key words: aluminum alloy, shallow shell, nonlinear oscillations, a model of sustainability, added mass, sensors, voltage, frequency.

УДК 624.074.434

Введение

Все более широкое распространение получают пологие оболочки при строительстве большепролетных зданий и сооружений. Для снижения массы таких конструкций применяются алюминиевые сплавы. При эксплуатации тонких оболочек возникают интенсивные циклические нагрузки (ветровые), вследствие чего появляются значительные собственные колебания оболочки. Снеговую нагрузку и различное оборудование, расположенное на кровле, принято считать за присоединенную массу. Наличие присоединенной массы существенно влияет на колебания оболочки, что вызывает необходимость проведения дополнительных исследований динамики пологих оболочек, несущих присоединенную массу [1-4].

Экспериментальные исследования

Для исследования влияния величины присоединенной массы на собственные колебания пологих цилиндрических оболочек в лаборатории КНАГУ был изготовлен специальный стенд, опытный образец, согласно расчетной схеме (см. рис. 1) [5].

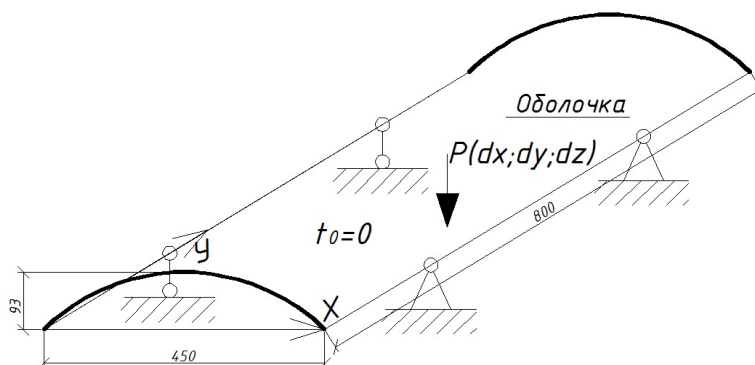


Рис. 1. Образец оболочки

Целью исследования является изучение влияния величины присоединенной массы на собственные колебания оболочки. Оболочка шарнирно-оперта, так как эта модель широко используется в строительстве. С помощью общего уравнения колебаний оболочки, существующей

формы описания колебания оболочек получены линейные уравнения колебаний оболочки, а также экспериментальные данные, показывающие зависимость между величиной присоединенной массы и величиной собственных колебаний оболочки. Для большей простоты рассмотрения формы колебаний оболочки разложили согласно уравнений [5-7]. В результате выявлена дискретная нелинейная модель колебаний пологой оболочки, несущей присоединенную массу, с двумя степенями свободы. Далее модель была исследована с помощью метода многих масштабов.

Эксперимент проведен на модели тонкостенной цилиндрической полой разомкнутой оболочки. Материалом образца является алюминиевый сплав марки Д19. Геометрические характеристики образца: $R = 318$ мм, $L = 800$ мм, $H = 93$ мм, $\delta = 0,4$ мм. Схема образца представлена на рис. 1.

Оболочка устанавливается в стенд, изготовленный в лаборатории строительных конструкций КНАГУ. Стенд реализует граничные условия, приближенные к расчетной математической модели. Для измерения частоты колебаний в верхней точке (см. рис. 1) закреплен акселерометр BC 110, одновременно выполняющий роль присоединенной массы (см. рис. 2). Датчик обладает возможностью крепления дополнительного груза суммарной массой до 250 гр. Несколько таких датчиков позволяют моделировать систему присоединенных масс в различных вариациях. Также присутствует бесконтактный датчик измерения колебаний.

Акселерометр передает сигнал в анализатор спектра и далее в программу «Z-LAB», установленную на персональном компьютере. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

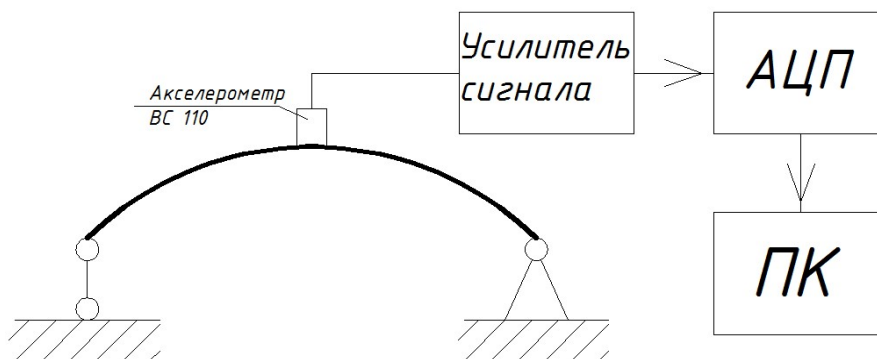


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки

Вынужденные колебания создавались двумя способами: путём кратковременного приложения нагрузки за счет моментного взаимодействия испытательного молотка АУ03 и оболочки (удара); путем моментального снятия присоединенной массы. Два различных способа взаимодействия, имеющие схожие параметры: колебания оболочки (Гц), наличие присоединенной массы (M_0), но различные механизмы взаимодействия элементов. Взаимодействие молотка и оболочки схоже с механизмом работы оболочки, несущей присоединенную массу, при выпадении атмосферных осадков. Механизм работы оболочки, несущей присоединенную массу, при мгновенном снятии нагрузки напоминает механизм действия оболочки, несущей присоединенную массу, при удалении какой-либо нагрузки, например, атмосферных осадков, обледенения. С механизмом работы оболочки, несущей присоединенную массу, при двух вышеперечисленных воздействиях можно ознакомиться в данной статье, а также в соответствующей литературе [8; 9].

Замеры снимались двумя датчиками, расположенными в различных плоскостях: первый – выполняющий роль присоединенной массы BC 110; второй – бесконтактный, закрепленный на штативе вблизи оболочки. Его можно наблюдать на рис. 3. При проведении эксперимента были получены опытные характеристики колебаний оболочки в различные моменты времени от двух датчиков. Величина расхождения колебаний от датчиков составляет 1,5 % и менее, что говорит о достаточной точности проведения эксперимента. Также получена величина силы возбуждения

колебаний, измеряемая в Ньютонах. Величина присоединенной массы известна в граммах. На рис. 3 изображена экспериментальная установка.

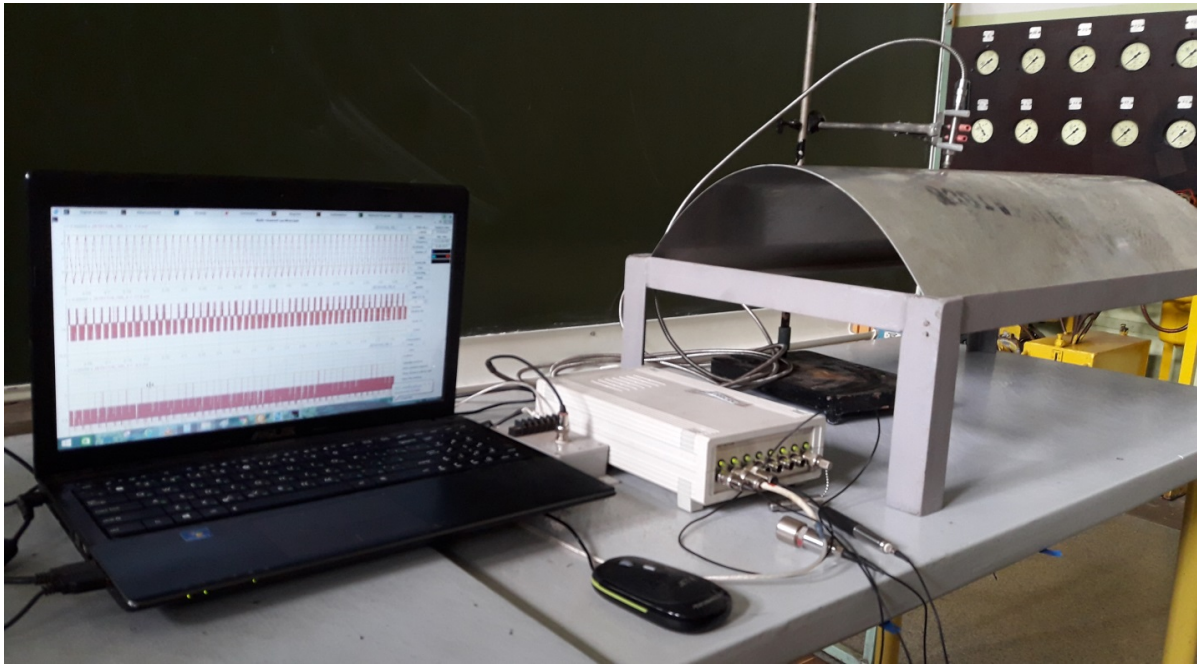


Рис. 3. Экспериментальная установка

Теоретические исследования

Определяя теоретические колебания пологой разомкнутой оболочки, прямоугольной в плане (см. рис. 3), воспользуемся известными уравнениями для расчета колебаний оболочки [9]. Граничные условия представим для шарнирно-опертой с двух сторон оболочки. Пологость оболочки в данном расчете не учитывается. Изгибающие моменты, выраженные в величине напряжений, соотносятся с величинами напряжений, полученных от усилий:

$$D\nabla^4 w + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \beta \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi \partial^2 w}{\partial y^2 \partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + P \cos(\Omega t) \delta(x_0, y_0);$$

$$\frac{1}{E} \nabla^4 \Phi = \frac{-1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial xy} \right)^2 - \frac{\partial^2 w \partial^2 w}{\partial x^2 \partial y^2},$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость; w – нормальное смещение срединной поверхности оболочки; m – масса единицы площади оболочки; β – коэффициент линейного демпфирования; r – радиус кривизны оболочки в направлении оси y ; $\delta(x_0, y_0)$ – функция Дирака (дельта); E – модуль упругости; h – толщина оболочки; ν – коэффициент Пуассона; (x_0, y_0) – точка расположения приложенной нагрузки.

Граничные условия $y = 0$ и $y = a_1$ шарнирно-опертых сторон оболочки, а для свободных сторон $x = 0$ и $x = a_2$ выражаются в краевых условиях задачи и принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} N_x|_{x=0} = N_x|_{x=a_2} = N_{xy}|_{x=0} = N_{xy}|_{x=a_2} = 0; \quad w|_{y=0} = w|_{y=a_1} = 0; \\ M_y|_{y=0} = M_y|_{y=a_1} = 0; \quad M_x|_{x=0} = M_x|_{x=a_2} = 0; \\ \left(Q_x + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} \right) \Big|_{x=0} = \left(Q_x + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} \right) \Big|_{x=a_2} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$N_x = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}; \quad N_y = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}; \quad N_{xy} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}; \quad Q_x = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right);$$

$$M_{xy} = D(1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}; \quad M_x = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right); \quad M_y = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right).$$

Изгибные колебания $w(x, y, t)$ для нашего случая колебаний оболочки представим в следующем виде:

$$w(x, y, t) = \phi_1(t)\psi_1(x, y) + \phi_2(t)\psi_2(x, y), \quad (2)$$

где $\psi_1(x, y), \psi_2(x, y)$ – собственные формы колебаний оболочки.

Найдем собственные формы линейных колебаний цилиндрической пологой прямоугольной в плане оболочки. Это необходимо для выражения (2) и точного интегрирования в систему системы уравнений, описывающих математически эти колебания:

$$D\nabla^4 w - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - m\omega^2 w = 0,$$

$$\frac{1}{E} \nabla^4 \Phi + \frac{1}{\kappa} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 0. \quad (3)$$

Согласно условиям, что на краях оболочки реализуются условия $y = 0$ и $y = a_1$, т.е. оболочка шарнирно-опертая по краям (1), функции $w(x, y), \Phi(x, y)$ выразятся следующим образом:

$$w(x, y) = W(x) \sin \frac{n\pi y}{a_1}; \quad \Phi(x) = \chi(x) \sin \frac{n\pi y}{a_1}.$$

Переменные $W(x)$ и $\chi(x)$ хорошо выражаются следующими уравнениями:

$$D \left(W_{xxxx} - 2 \frac{n^2 \pi^2}{a_1^2} W_{xx} + \frac{n^4 \pi^4}{a_1^4} W \right) - \frac{1}{r} \chi_{xx} - m\omega^2 W = 0;$$

$$\frac{1}{Eh} \left(\chi_{xxxx} - 2 \frac{n^2 \pi^2}{a_1^2} \chi_{xx} + \frac{n^4 \pi^4}{a_1^4} \chi \right) + \frac{1}{r} W_{xx} = 0. \quad (4)$$

Решение системы (4) представим так:

$$W(x) = \sum_{i=1}^8 \alpha_{1i} C_i e^{\lambda_i x}; \quad \chi(x) = \sum_{i=1}^8 \alpha_{2i} C_i e^{\lambda_i x}. \quad (5)$$

В результате получаем корни характеристического уравнения λ_i , соответствующие системе (4), α_{1i}, α_{2i} – постоянные, соответствующие нулевому решению системы уравнений, полученных при $\lambda = \lambda_i$ из выражения (5). Сверка с краевыми условиями задачи приводит к системе линейных алгебраических уравнений относительно C_i . Далее легко получить частное уравнение, выражающееся в определителе 8-го порядка. Определитель не приводим из соображений кратности изложения. Определение частоты из системы линейных алгебраических уравнений находим переменные C_i , а собственные формы линейных колебаний представляют собой

$$\psi(x, y) = \sin \frac{n\pi y}{a_1} \sum_{i=1}^8 \alpha_{1i} C_i e^{\lambda_i x}. \quad (6)$$

Уравнение (6) отражает формы колебаний оболочки. Для проверки аналитических исчислений проведем численное прямое интегрирование системы. Результаты этого самого интегрирования очень хорошо пересекаются с аналитическими данными.

На рис. 4 представлены аналитические и экспериментальные зависимости между частотой колебаний оболочки и величиной присоединенной массы цилиндрической разомкнутой оболочки из алюминиевого сплава Д19.

Из графика следует несоответствие расчетных и экспериментальных данных, их расхождение увеличивается с увеличением присоединенной массы. Это означает несоответствие теории колебаний оболочки с присоединенной массой, принятой на сегодня [9-11].

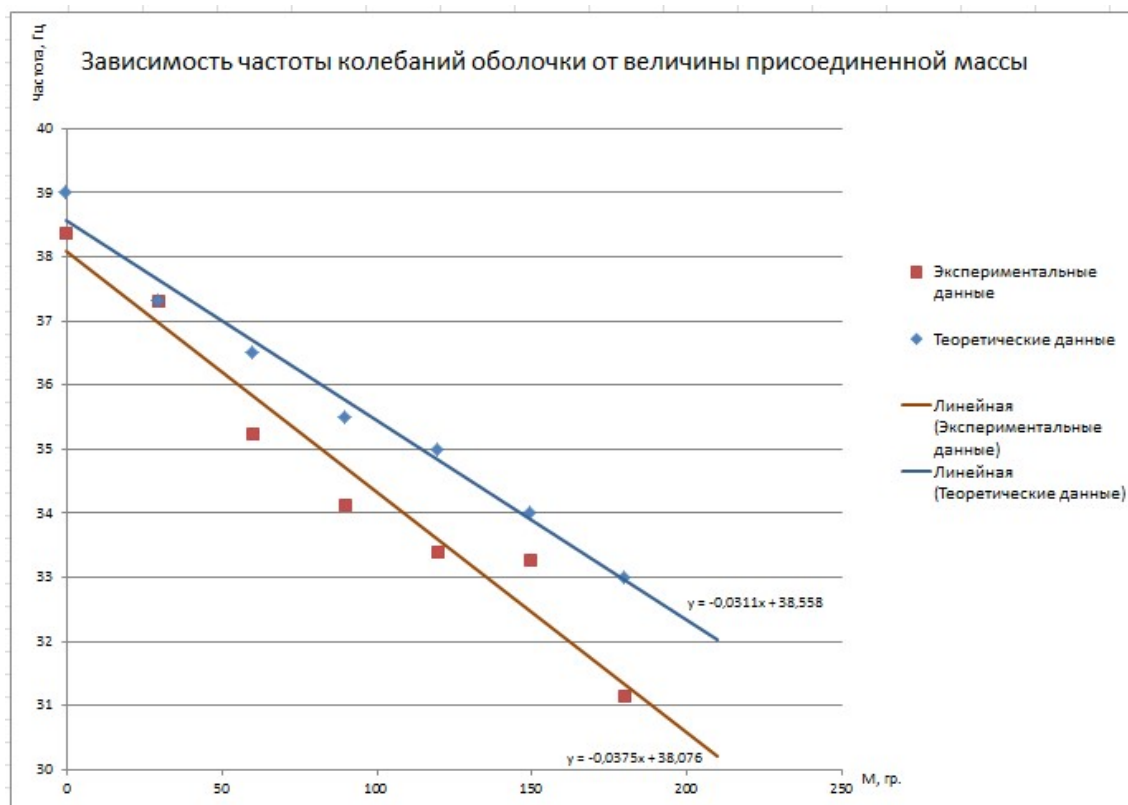


Рис. 4. Зависимость частоты колебаний оболочки от величины присоединенной массы

Заключение (выводы)

Расхождение экспериментальных данных с теоретическими составляет почти 8 % при присоединенной массе в 180 г, что требует более глубокого дальнейшего изучения влияния присоединенной массы на вынужденные колебания разомкнутых цилиндрических оболочек. Такое расхождение расчетных данных с реальным поведением алюминиевых конструкций может привести к внезапным и непредсказуемым разрушениям зданий и сооружений и создает большую опасность для жизни людей.

Наличие присоединенной массы, а как правило при эксплуатации зданий и сооружений она изменяется в большую сторону, существенно изменяет величину колебаний оболочки. На колебания влияют не только форма, размеры, способ крепления присоединенной массы, но и массовые характеристики. Из работ [8; 9] следует, что современная теория колебаний оболочек достаточно тонко отражает картину колебаний оболочки, несущей присоединенную массу.

Для снижения отклонения величины колебаний в теоретических расчетах следует в уравнение (2) ввести дополнительную функцию $k(\ddot{v}(x, y, z, t) * \phi^3(t))$. Данная функция зависит от матрицы $\ddot{v}(x, y, z, t)$, определяющей характеристики присоединенной массы или даже системы присоединенных масс. Тогда уравнение (2) примет другой вид:

$$w(x, y, t) = \phi_1(t)\psi_1(x, y) + \phi_2(t)\psi_2(x, y) + k(\ddot{v}(x, y, z, t) * \phi^3(t)).$$

Тогда и уравнение (3) примет другой вид:

$$D\nabla^4 w - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - m\omega^2 wr^e = 0;$$

$$\frac{1}{E} \nabla^4 \Phi + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + y^3 \sqrt{\Delta} = 0.$$

В результате формы колебаний описывают коричневую прямую (квадратные точки в рамках допустимой погрешности) на рис. 4 – экспериментальные данные.

В современных зданиях широко используются системы кондиционирования, отопления, солнечные панели и другое оборудование различной массы, имеющие тенденцию к увеличению параметров. С увеличением массы оборудования фактически возникающие колебательные процессы будут все больше отличаться от теоретических, что может привести к катастрофам. Для обеспечения безопасной работы зданий и сооружений требуется создание систем мониторинга, работающих в режиме онлайн, и систем, генерирующих колебания для гашения вынужденных колебаний, возникающих от внешней среды, при этом в расчетах необходимо учитывать дополнительную функцию $(\ddot{v}(x, y, z, t) * \phi^3(t))$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малышев, А. П. Дифференциальная модель частотно-независимого рассеяния энергии при колебаниях / А. П. Малышев // ПММ. – 2002. – Т. 66, вып. 1. – С. 127-133.
2. Григолюк, Э. И. Многослойные армированные оболочки. Расчет пневматических шин / Э. И. Григолюк, Г. М. Куликов. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
3. Куликов, Г. М. Нелинейные колебания многослойных пластин / Г. М. Куликов, Ю. В. Кулешов // Вестник Тамбовского гос. ун-та. – 2004. – Т. 9, вып. 2. – С. 264-267.
4. Добрышкин, А. Ю. Влияние отсоединенной массы на параболические строительные конструкции / А. Ю. Добрышкин, Ху Яфэнг, О. Е. Сысоев // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 26-27 ноября 2015 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – С. 91-96.
5. Современные испытательные стенды для бесконтактного исследования свободных колебаний замкнутых и разомкнутых цилиндрических оболочек / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн, К. К. Кахоров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2017. – № I-1(29). – С. 110-118.
6. Серёгин, С. В. Свободные колебания тонкой круговой цилиндрической оболочки, ослабленной отверстием / С. В. Серёгин, О. Е. Сысоев // Тезисы докладов 2-й междунар. конф. «Живучесть и конструкционное материаловедение» (SSMS-2014, 21-23 октября 2014 г.) ФГБУН Институт машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН. – М., 2014. – С. 66.
7. Долговечность конструкционных строительных материалов при циклическом нагружении / О. Е. Сысоев, С. В. Макаренко, Е. А. Кузнецов, С. В. Серёгин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2015. – № II-1(22). – С. 90-94.
8. Сысоев, О. Е. Факторы, влияющие на разрушение зданий оболочечного типа / О. Е. Сысоев, К. К. Кахоров // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / отв. ред. О. Е. Сысоев. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2017. – С. 55-60.
9. Сысоев, О. Е. Влияние присоединенной массы на вынужденные колебания разомкнутых оболочек / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, Нейн Сит Ньянг // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2016. – № III-1(27). – С. 110-117.
10. Amabili, M. Non-linear vibrations of doubly curved shallow shells. *Int. J. of Non-Linear Mech.* 40, 2005. – P. 683-710.
11. Amabili, M. Theory and experiments for large-amplitude vibrations of circular cylindrical panels with geometric imperfections. *J. of Sound and Vibration* 2006, 298. – P. 43-72.
12. Norachan, P. A co-rotational 8-node degenerated thin-walled element with assumed natural strain and enhanced assumed strain / P. Norachan, S. Suthasupradit, K.-D. Kim // *Finite Elem. Anal. Des.* – 2011. – V. 50. – P. 70-85.
13. Bochkarev, S. A. Natural vibrations and stability of shells of revolution interacting with an internal fluid flow / S. A. Bochkarev, V. P. Matveenko // *J. Sound Vib.* – 2011. – V. 330, № 13. – P. 3084-3101.
14. Xue, L. Parametric FEA study of burst pressure of cylindrical shell intersections / L. Xue, G.E.O. Widera, Z. Sang // *Journal of Pressure Vessel Technology.* – 2010. – Vol. 132. – № 3. – P. 313-319.

Жилин С. Г., Комаров О. Н.
S. G. Zhilin, O. N. Komarov

ИТОГИ ВТОРОЙ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ШКОЛЫ-СЕМИНАРА «ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА В КАЧЕСТВЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И КОНСТРУКЦИЙ»

RESULTS OF SECOND FAR-EASTERN SCHOOL-SEMINAR «FUNDAMENTAL MECHANICS AS THE BASIS OF IMPROVEMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING, TECHNICAL EQUIPMENT AND CONSTRUCTIONS»

Жилин Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru.

Mr. Sergey G. Zhilin – PhD in Engineering, Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru.

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

Mr. Oleg N. Komarov – PhD in Engineering, Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

В период с 11 по 15 сентября 2017 года в Комсомольске-на-Амуре на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМиМ ДВО РАН) состоялась II Дальневосточная школа-семинар «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций». В число организаторов мероприятия, помимо ИМиМ ДВО РАН, вошли также Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» и Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Лейтмотивом школы-семинара, ставшей преемницей одноименной конференции, проведенной во Владивостоке в октябре 2014 года [1], стал 70-летний юбилей выдающегося российского учёного, специалиста в области механики деформируемого твёрдого тела, член-корреспондента РАН Анатолия Александровича Буренина. Многолетний опыт юбиляра в области исследований свойств поверхностей разрывов деформаций, решений автомодельных задач о взаимодействии между собой ударных волн и их взаимодействии с преградами при высокоскоростных соударениях деформируемых тел определил во многом тематику школы-семинара. Предложенная А. А. Бурениным теория конечных упругопластических деформаций, базирующаяся на новом подходе к определению обратимых и необратимых деформаций, легла в основу широкого спектра задач фундаментального и прикладного значения [2; 3].

Несомненный авторитет юбиляра в науке позволил привлечь в программный комитет конференции известных ученых, среди которых яркие представители ведущих научных школ механики, известные как в РФ, так и за рубежом, академики РАН: Владимир Алексеевич Левин, Ирина Георгиевна Горячева, Никита Федорович Морозов, Валерий Павлович Матвеев. Программный комитет школы-семинара возглавил академик РАН Михаил Александрович Гузев. Председателем организационного комитета стал доктор технических наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Алексей Иванович Евстигнеев.

Целью школы-семинара является ознакомление молодых ученых с современным состоянием исследований в таких направлениях, как основы технологической механики, механика разрушений и контактных взаимодействий, механика жидкости и газа, математические и вычислительные проблемы механики сплошных сред.

Работу школы-семинара предварил доклад Анатолия Александровича Буренина с пожеланиями успешной деятельности молодым ученым в выбранных ими научных направлениях (см. рис. 1), а также уверенностью в продолжении традиций проведения на Дальнем Востоке мероприятий, объединенных названием «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций». На рис. 2 молодые ученые представляют свои доклады.



Рис. 1. Буренин Анатолий Александрович выступает с приветственной речью на открытии заседания школы-семинара

В ходе работы школы-семинара молодыми учеными представлены доклады на актуальные темы.

В секции основ технологической механики значительное место заняли доклады, посвященные вопросам применения технологий, направленных на решение проблем сбережения ресурсов и энергии. Докладчиками этой секции рассмотрены особенности распределения свойств в металло-керамических телах вращения, получаемых центробежной разливкой алюмотермитных сплавов, возможности формирования отливок, получаемых указанным выше способом с однородными свойствами, а также влияние процессов термической обработки таких заготовок на образование упорядоченной структуры в них. Интерес вызвали доклады, посвященные решению проблем, возникающих при получении литых заготовок специальными способами: определение критериев постановки задач математического моделирования напряженно-деформированного состояния керамических оболочковых форм; оптимизация времени нагружения воскообразных модельных материалов с целью сокращения упругого отклика прессованных удаляемых моделей; вопросы формирования тела протяженной прессованной модели в условиях нестационарного теплового режима при мундштучном уплотнении. Решение задач практической направленности нашло отражение в докладах, посвященных математическому моделированию процессов горячей посадки заклепок, а также вопросу ползучести вращающегося цилиндра с неравномерными свойствами.

Особое место в работе школы-семинара заняли циклы докладов молодых ученых, вызывающих интерес для специалистов различных областей исследований и представленных сразу в нескольких секциях. Так, в секции технологической механики прозвучал доклад о влиянии гранулометрии компонентов алюмотермитных смесей на заполняемость порошковой проволоки для сварки, а в секции механики разрушений и контактных взаимодействий представлен доклад о распределении температурных напряжений в конструкции из стальных пластин, сваренных при помощи порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем.

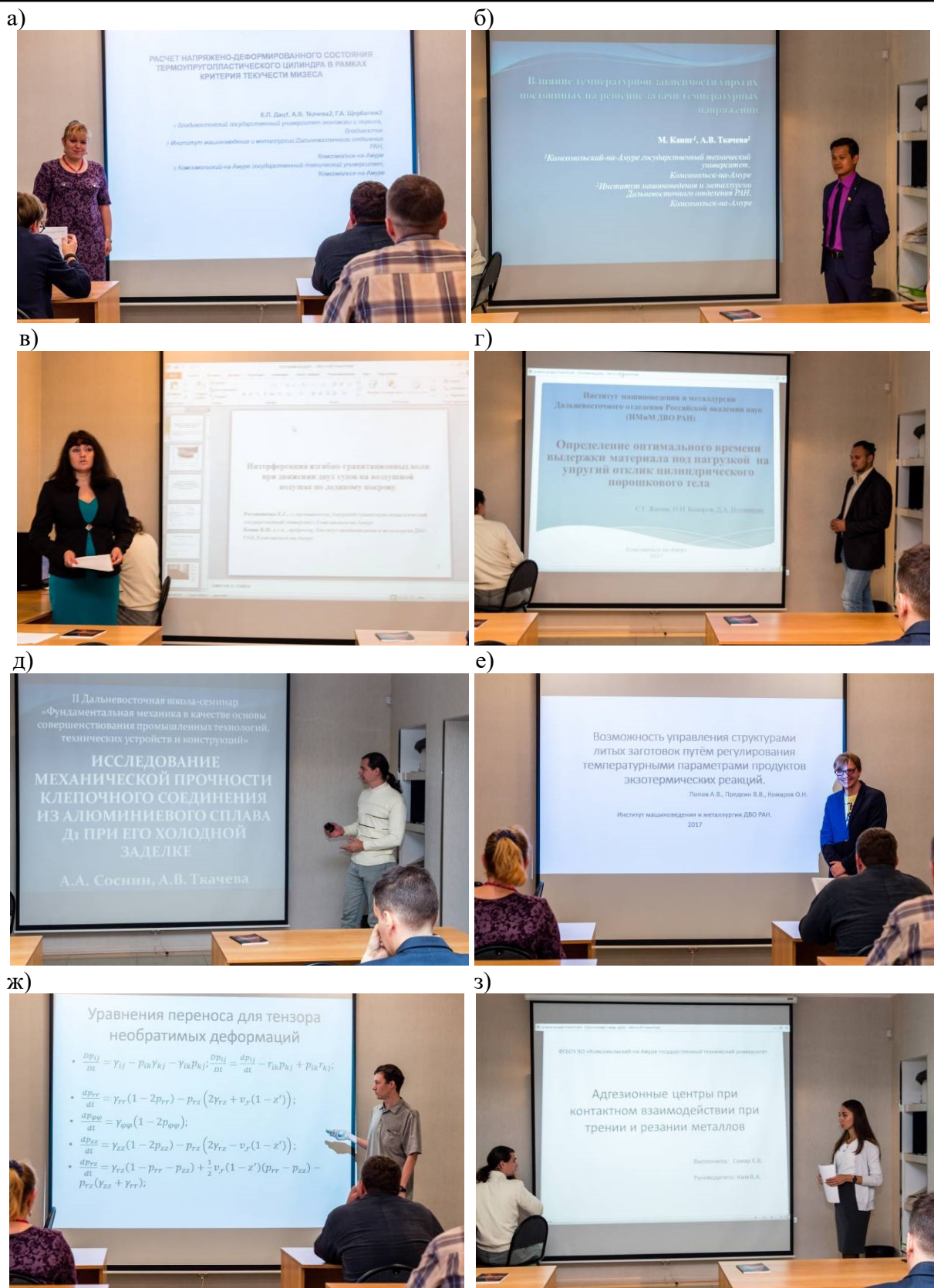


Рис. 2. Молодые ученые представляют результаты научных исследований:
 а – А. В. Ткачева; б – М. Каинг; в – Е. Г. Рогожникова; г – Д. А. Потянихин;
 д – А. А. Соснин; е – А. В. Попов; ж – С. В. Фирсов; з – Е. В. Самар

В отмеченной секции также широко представлены результаты исследований, связанных с изучением предельного состояния и оценкой прочности разномодульно-упругих конструкций, а также посвященных вопросу адекватности имитационного моделирования процесса резания. Отдельным блоком в секции механики разрушений и контактных взаимодействий представлены доклады, связанные с ледовой тематикой: изучение влияния свойств льда на прогибы ледяного покрова; интерференция изгибно-гравитационных волн в результате движения по нему двух судов на воздушной подушке; установление зависимости резонансной скорости такого судна от направлений подледного течения, а также динамика нагружения ледового покрова при изменении его толщины.

Значительное число докладов, представленных в секции математических и вычислительных проблем механики сплошных сред, отражает новые и нетрадиционные методы актуальных исследований: модифицированные методы двойственности, предназначенные для решения вариационных задач механики; метод решения задачи о равновесии упругого тела с отслоившимся жестким включением; учет трения в модифицированных функционалах Лагранжа для решения задачи контакта двух тел; расчет напряжений термоупругопластического цилиндра в рамках критерия текучести Мизеса; применение лучевого метода при решении нестационарных задач связанной термоупругости с ударными волнами. Часть докладов этой секции, отражающих вопросы математического моделирования процессов в материалах, связанных с их упругостью и пластичностью, посвящена учету вязкости на разных стадиях деформирования материала в зазоре коаксиальных цилиндров, установившемуся течению пластически сжимаемых сред в каналах, ползучести и пластического течения материала сферического слоя, течению упрочняющейся вязкоупругопластической среды в канале и др. В рамках данной секции были также представлены доклады, отражающие отдельные аспекты самостоятельных исследований, посвященных анализу в системах автоматизации инженерных расчетов рациональных процессов формообразования для режима ползучести пластинки двойной кривизны при помощи стержневого пуансона, а также численному моделированию капсулированного теплоаккумулирующего плавящегося материала с газовым теплоносителем.

Презентации докладчиков отражали результаты не только отдельных экспериментов, но и подготовленных к защите диссертаций. Несомненной особенностью нынешней конференции является доминанта докладов, имеющих прикладное значение.

В рамках отведенного времени на обсуждение докладов, а также в ходе кулуарных дискуссий молодым ученым представилась возможность обмена результатами исследований. Принципиальным моментом в организации мероприятия являлось отсутствие конкурсной составляющей при подведении итогов работы конференции, определяющим недопустимость ранжирования докладов по степени их проработки или значимости, поскольку проведение школы-семинара направлено на содействие включению молодых ученых, студентов и аспирантов в научное сообщество и сокращение разрыва между достижениями фундаментальной науки и их практическим применением. Программой школы-семинара также были предусмотрены циклы лекций ведущих ученых, ознакомление участников с возможностями и перспективами использования наукоемкого оборудования, способствующие научному росту молодых ученых.

II Дальневосточная школа-семинар получила финансовую поддержку Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта 17-38-10233. С материалами сборника [4] можно ознакомиться на сайте мероприятия: <http://www.imim.ru/index.php/konferentsii/ii-konferentsiya-2017>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дальневосточная школа-семинар «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций» 30 сентября – 3 октября 2014 г.: тезисы докладов. – Владивосток: ИМиМ ДВО РАН, 2014. – 75 с.
2. Буренин, А. А. Возможность повторного пластического течения при общей разгрузке упругопластической среды / А. А. Буренин, Л. В. Ковтанюк, М. В. Полоник // Доклады Академии наук. – 2000. – № 6. – С. 767.
3. Буренин, А. А. Большие необратимые деформации и упругое последствие / А. А. Буренин, Л. В. Ковтанюк. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 312 с.
4. Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций: материалы II Дальневосточной школы-семинара, Комсомольск-на-Амуре, 11-15 сентября 2017 г. / редкол.: А. И. Евстигнеев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2017. – 96 с.