

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621. 039

**ПРОБЛЕМА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В АТОМНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ НА ПРИМЕРЕ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ МАШИНЫ**

© 2016 г. П.Д. Кравченко\*, А.Д. Маляренко\*\*

\* *Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Россия*

\*\* *Белорусский национальный технический университет – БНТУ, Минск, Беларусь*

В статье рассмотрена проблема долговременного применения громоздкого сложного транспортно-технологического оборудования на примере перегрузочной машины с жёсткими телескопическими звеньями для обслуживания ядерных реакторов типа ВВЭР. Предложена новая, упрощенная, конструктивная схема перегрузочной машины с канатным подвесом автоматических грузозахватных устройств, позволяющая снизить на порядок вес и количество конструктивных элементов и повысить уровень безотказности при эксплуатации.

Ключевые слова: перегрузочная машина, атомное машиностроение, рабочая штанга, канатный подвес, эвристический метод, проектирование, АЭС.

Поступила в редакцию 20.03.2016 г.

Машина перегрузочная МПС-В-1000-3.У4.2 для серийной реакторной установки ВВЭР-1000 предназначена для выполнения 18 операций перемещения и установки объектов на технологические позиции с обеспечением необходимых условий безопасности эксплуатации и точности выполнения операций всего транспортно-технологического комплекса [1].

Основные типы операций, выполняемых с помощью МП-1000, условно можно разделить на следующие подгруппы:

- выгрузка, транспортировка, установка кассет с тепловыделяющими элементами (ТВЭлами) и поглощающими элементами (пЭлами) или стержнями выгорающих поглотителей (свп);
- выемка, транспортировка и установка пучков пЭлов или свп;
- открывание, транспортировка, установка на заданную позицию и закрывание пробок гермопеналов или пеналов системы обнаружения дефектных сборок (СОДС);
- загрузка, транспортировка, установка гермопеналов в транспортные контейнеры и другие операции перемещения пеналов и кассет;
- осмотр мест установки объектов и контроль их положения с помощью специальных осмотровых устройств.

Конструктивная схема МП-1000 создана на основе концепции создания манипуляционных роботов-манипуляторов с жесткими звеньями.

Особенностью МП-1000 является применение в качестве основного, особо ответственного, исполнительного органа (ИО) жесткой длинной вертикальной телескопической рабочей штанги весом более 12 т, предназначенной для выполнения основных рабочих движений по вертикальной оси и создания вращающего момента  $M_{вр}=1000$  Нм при открывании пробки гермопенала или пенала СОДС.

Машина МП-1000 весит более 84 т, является фактически мостовым краном с шириной подкрановой колеи моста 7300 мм и жестким подвесом ИО – рабочей штанги длиной более 14 м.

Известно множество конструкций подъемно-транспортного оборудования в виде мостовых кранов с гибким (канатным) и жестким подвесом исполнительных органов для захвата, перемещения и установки перемещаемых объектов на заданные технологические позиции.

Краны общемашиностроительные, металлургические, монтажные, краны-штабелеры и другие специализированные типы кранов выполняют множество операций различной сложности. Машина МП-1000 выполняет также множество операций, отличающихся по сложности только условиями обеспечения высокой точности позиционирования объектов в зоне с высоким уровнем радиоактивности и необходимостью обеспечения заданной величины вращающего момента относительно вертикальной оси объекта – пробки пенала.

Оценим конструктивное совершенство МП-1000 с применением общепринятых критериев.

В подъемно-транспортном машиностроении рассмотрим предлагаемый критерий, выражаемый отношением веса транспортирующей машины к весу перемещаемого объекта, называемый коэффициентом конструктивного совершенства  $K_{кс}$ :

$$K_{кс} = G_m / G_o,$$

где  $G_m$  – вес машины;

$G_o$  – вес перемещаемого объекта.

При весе МП-1000 84830 кг (для 5 блока Нововоронежской АЭС) и весе кассеты с топливными элементами – основного перемещаемого объекта – 753 кг коэффициент конструктивного совершенства МП-1000 равен 112,6.

Чем меньше  $K_{кс}$ , тем выше конструктивное совершенство машины (при сравнимых условиях перемещения – времени и качества выполнения технологических операций).

Для мостовых кранов общепромышленного применения значение  $K_{кс}$  близко к единице, для кранов с жестким подвесом объектов перемещения и кранов-штабелеров  $K_{кс} = 2 \dots 4$ .

При использовании аналогичного подхода в новой концепции [2, 4– 7] технологического процесса механической обработки и перемещения объектов тяжелого и атомного машиностроения предложены перспективные предложения по проектированию оборудования, позволяющие еще на предпроектной стадии принять решение об упрощенном экономичном способе обработки объектов с использованием в качестве критерия удельную металлоемкость, т. е. отношение веса обрабатываемого или транспортирующего оборудования к весу обрабатываемого или транспортируемого объекта.

После тщательного анализа всех операций, выполняемых всеми указанными типами подъемно-транспортных машин, можно заключить, что конструкция МП-1000 далека от совершенства.

Однако такие машины эксплуатируются уже более 30 лет.

Возникла проблема усовершенствования конструкций оборудования атомного машиностроения.

Принятию решения об использовании именно такой вышеуказанной схемы МП-1000 способствовали две главные причины:

1) Опасения конструкторов о возможности проявления нештатных ситуаций во время эксплуатации машины в опасной радиоактивной среде и задание при проектировании в связи с этим дополнительных коэффициентов запаса прочности и надежности элементов машины.

2) Отсутствие альтернативных проектных решений, выполненных с применением эвристических методов поиска лучших технических решений, что привело к созданию конструктивной схемы по подобию манипуляционных роботов-манипуляторов с длинными жесткими массивными телескопическими звеньями.

Кроме того, на принятие решения повлияло поведение лиц, принимающих решения (ЛПР) в условиях отсутствия конкурентоспособных альтернативных решений и недоверие к ПТМ с канатным подвесом объектов перемещения.

Заметим, что эвристический поиск лучшего технического решения [3], особенно в случае решения проблемы перемещения объекта, следует проводить с учетом принципов «паука», «муравья», перемещающих объекты массой, в десятки и сотни раз превышающие собственную массу и принцип «рыболова», который перемещает объекты массой, в тысячи раз превышающей массу удочки.

Подробный анализ операций, выполняемых известными типами ПТМ, привел к выводу, что перегрузочная машина может быть изготовлена по конструктивной схеме общемашиностроительного мостового крана с широко применяемым сдвоенным канатным полиспастом вместо рабочей штанги. Требуется только обеспечить выполнение ответственной операции поворота пробки пенала относительно вертикальной оси с применением вращающего момента  $M_{вр} = 1000$  Нм.

Решение о создании подвесных грузозахватных устройств, работающих на канатном подвесе, сначала было принято только для обеспечения условий поворота пробки пенала относительно вертикальной оси при движении по вертикали дополнительной нагрузочной массы, однако добавление промежуточной переходной втулки позволило как увеличить вращающий момент за счет увеличения плеча момента, так и осуществить поворот и захват пробки пенала за одну операцию. Рассмотрим логическую схему для предварительного сравнения конструктивных схем перегрузки объектов с жестким и гибким подвесом ИО для работы с объектами, представленную на рисунке 1.

Схема представляет собой объект 1 в виде пробки гермопенала, которую нужно открыть с приложением вращающего момента  $M_{вр} = 1000$  Нм относительно вертикальной оси. На схеме рис. 1, а это происходит за счет применения электромеханического привода поворота рабочей штанги 2 относительно вертикальной оси. Машина перегрузки 3 в этом случае получается громоздкой и массивной. С применением гибкого подвеса 4 в виде подъемной лебедки крана с двойным полиспастом, к нижним блокам 6 которого подвешен исполнительный орган 7, захватывающий и поворачивающий объект под действием собственного и дополнительного веса, система явно упрощается.

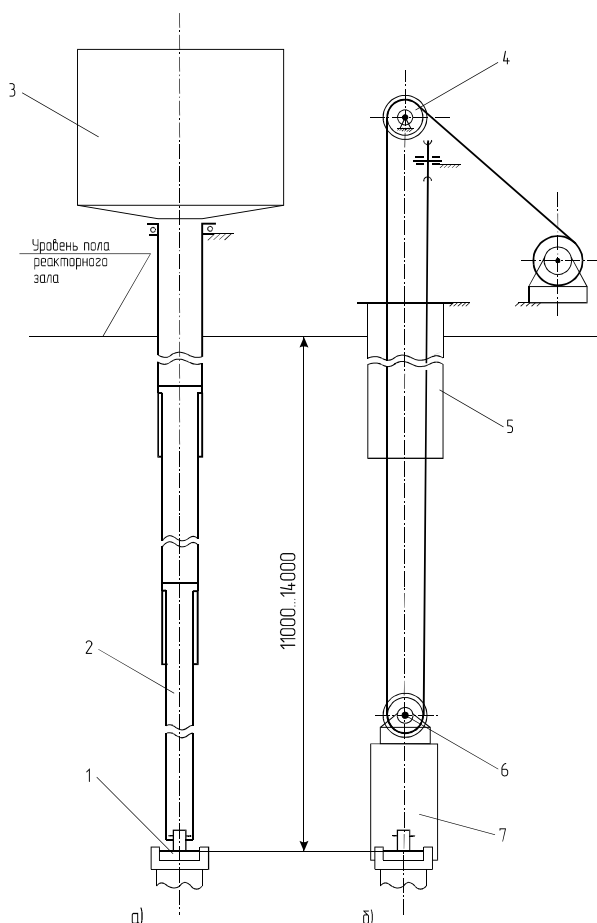
Здесь работает безотказная сила тяжести, электромеханический привод не нужен. Тонкостенная трубная секция 5 служит только для страховки ИО вместе с объектом только во время транспортировки.

Предварительные ориентировочные расчеты показывают, что вес машины МПК с предложенной гибкой системой подвеса ИО составит не более 8т.

Это на порядок ниже веса применяемой более 30 лет машины МП1000.

Одной из основных причин принятия конструктивной схемы МП1000 было недоверие к конструкциям канатного подвеса, априори считающегося менее надежным, чем жесткая сплошная металлическая конструкция. Однако по теории надежности стальной канат, как соединение из множества параллельных элементов, при

увеличенных коэффициентах запаса, является более надежным, чем сплошная однородная металлическая конструкция. Более того, рабочая штанга, состоящая из трех последовательных элементов, уже на предпроектной стадии структурно оказывается менее надежной.



**Рис. 1.** – Предпроектная модель для сравнения схем перегрузки объектов:

- а) с жестким подвесом ИО; б) с гибким подвесом ИО; 1 – пробка гермопенала; 2 – рабочая штанга; 3 – машина МП1000; 4 – машина МПК с канатным подвесом ИО и объектов; 5 – страховочная труба; 6 – нижний блок сдвоенного полиспаста; 7 – автоматическое грузозахватное устройство с дополнительной нагрузочной массой.

Логическая схема, представленная на рисунке 1, является только исходной базовой. Для сравнения уровня надежности требуется конкретный расчет обеих схем по всем элементам.

Предварительно определенный вероятностный анализ безопасности [8] показал явное повышение уровня безопасности с применением машины перегрузки с канатным подвесом объектов.

Достоинства и недостатки обеих систем подвеса представлены в таблице 1.

Анализ параметров, представленных в таблице 1, требует внимательного подхода при рассмотрении каждого элемента. Если пункты 1 и 2 очевидны, то пункты 6, 7 и 8 требуется подтвердить расчетами параметров системы с гибким подвесом ИО. Пункты 3, 4 и 5 (особенно 5) также требуют строго расчетного обоснования, особенно с гибким подвесом ИО, а применение эвристических методов указывается нами как обязательный принцип при создании новой конструкции, т.к. авторами настоящей работы решения уже обоснованы и приняты, но это уровень «know-how».

Пункты 9, 10 и 11 показаны для подтверждения целесообразности рассмотрения

альтернативных конструктивных схем при проектировании такой сложной системы, как перегрузка топливных элементов в реакторе.

Комплексный анализ только логической схемы, назовем ее предпроектной, показывает перспективность применения системы с гибким подвесом ИО.

**Таблица 1.** – Сравнение достоинств и недостатков МП с жесткой и гибкой системами подвеса для работы с объектами

№	Параметр	Система с жестким подвесом	Система с гибким подвесом
1	2	3	4
1	Конструктивная сложность	Сложная	Простая
2	Практическая применимость	Широко применяется	Применяется редко
3	Надежность системы в целом	Обеспечивается за счет точного обеспечения требований при изготовлении и эксплуатации, что достигается с большими экономическими затратами	Обеспечивается за счет простоты конструктивной схемы. Надежность существенно выше. Расчетная
4	Точность выполнения технологических операций	Обеспечивается за счет сложной, но отработанной за длительный период эксплуатации конструктивной схемы и системы управления	Обеспечивается как простотой конструктивной схемы, так и простотой системы управления. Расчетная
5	Уровень сложности операции захвата, удержания, транспортировки и освобождения объекта	Весьма сложная, учитывая многосвязность исполнительных органов и многооперационность, связанную с многосвязностью	Простая, учитывая малозвеньность системы. Требуется изобретательские решения по упрощению операций и повышению надежности системы
6	Требуемая точность наведения исполнительного органа на объект	±3 мм, не более	10...15 мм, до 20 мм
7	Вес МП	Более 80 тс	Менее 8 тс
8	Время перегрузки объекта	Согласно требованиям, обеспечивающим надежность и безопасность операции. Известно по результатам эксплуатации	Согласно требованиям, обеспечивающим надежность и безопасность операции. Меньше времени работы системы с жестким подвесом. Расчетное
9	Ремонтопригодность	Низкая	Высокая
10	Обеспечение надежности и безопасности операции захвата, удержания, транспортирования и освобождения объекта	Согласно нормативным требованиям обеспечения безопасности работы с радиоактивными материалами	Согласно нормативным требованиям обеспечения безопасности работы с радиоактивными материалами
11	Сейсмостойкость	Расчетная. До 8 баллов по шкале MSK-64	Расчетная. Возможна до 9 баллов по шкале MSK-64

Указанные решения проверены экспериментально на модели в масштабе 1:5 подъемного устройства и АГЗУ машины перегрузочной с канатным подвесом МПК, представленной на рисунке 2.

Результаты проверки показали полную функциональную пригодность предложенной конструктивной схемы.

Предварительные ориентировочные расчеты показывают, что вес МПК не превосходит 8т при обеспечении работоспособности и безопасности эксплуатации в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к машине перегрузочной МП-1000.

Теоретически обоснована работоспособность автоматического грузозахватного устройства АГЗУ в МПК [7]. На модели успешно проведено множество испытаний других автоматических грузозахватных устройств.

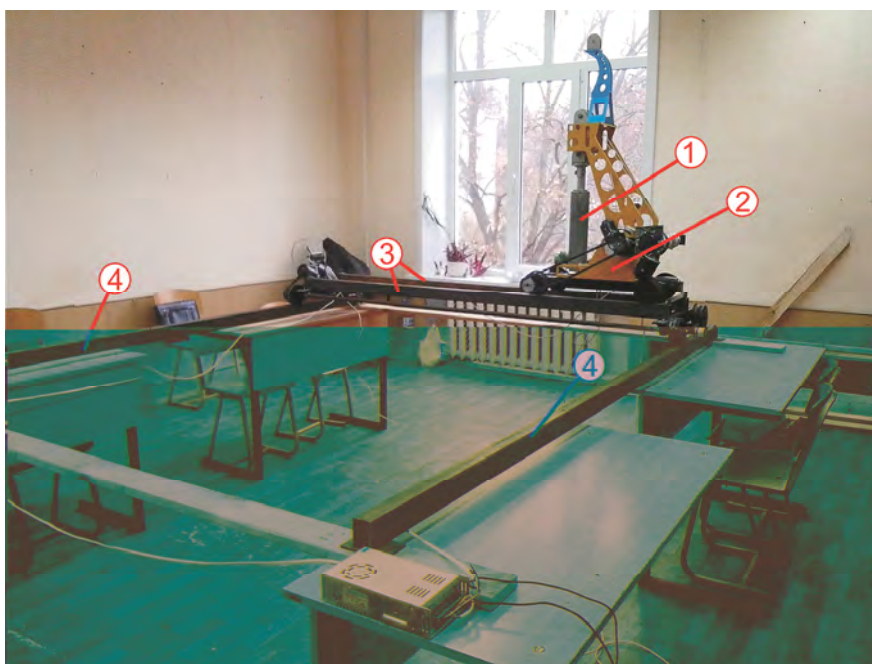
Вероятностный анализ безопасности эксплуатации МПК [8] показывает, что риск отказа МПК за время эксплуатации будет на порядок ниже риска отказа МП-1000.

Одним из основных условий, позволивших обеспечить повышение уровня вероятности безотказной работы МПК, явилось условие упрощения конструктивной схемы с применением канатного подвеса как элемента с множеством параллельных элементов системы и уменьшение на порядок количества деталей.

Упрощение конструктивной схемы логично привело к необходимости упрощения системы управления [9]. С учетом последних достижений в сфере промышленной электроники, в частности, опыта применения лазерных, оптических, ультразвуковых и других типов датчиков в различных условиях эксплуатации, система управления МПК, особенно при автоматическом режиме работы, существенно упрощена, однако это уровень “know-how” и здесь не рассматривается.

Вышеизложенное доказывает полезность и целесообразность применения указанной методики получения и применения перспективных решений, как более простых, а следовательно, более надежных.

Окончательное решение о принятии в производство и эксплуатацию оборудования, спроектированного по предложенной методике, естественно, возможно только после экспериментальной проверки натурального образца МПК в заводских условиях и опытно-промышленной эксплуатации.



**Рис. 2.** – Модель МПК. 1 – подвесное АГЗУ с дополнительной нагрузочной массой; 2 – тележка с механизмами подъема и передвижения; 3 – подтележечные рельсы; 4 – подкрановые рельсы.

## ВЫВОДЫ

1) При создании новой и модернизации существующей конструкции необходимо производить эвристический поиск различных конкурентоспособных вариантов.

2) Решение о разработке проекта с последующим внедрением его в производство и эксплуатацию должно быть принято в результате рассмотрения нескольких (не менее 2) альтернативных вариантов решений.

3) Решение должно быть принято после рассмотрения вариантов и заключения независимого профессионального экспертного совета, который должен руководствоваться общепринятыми критериями оценки технического совершенства, надежности и безопасности оборудования, применяемого в ядерной энергетике.

Настоящие выводы базируются на известных положениях методов проектирования и конструирования объектов новой техники, однако они вытекают из вышеприведенной методики, позволяющей показать практически полезные результаты инженерного проектирования именно с использованием методов эвристического поиска решения.

Создание конкурентоспособных решений при совершенствовании конструкций как модернизируемого, так и нового оборудования без использования интеллектуальной составляющей коллектива инженеров-конструкторов и изобретателей при доминирующей роли ЛПР приводит к неэффективным решениям.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панасенко, Н.Н. и др. Сейсмостойкие подъемно-транспортные машины атомных станций [Текст] / Н.Н. Панасенко, С.Г. Божко.– Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1987. – 208 с.
2. Кравченко, П.Д. и др. Проектирование нестандартного оборудования. Тяжелое и атомное машиностроение : монография [Текст] / П.Д. Кравченко А.Н. Дудченко, В.А. Нарыжный. – Шахты: ЮРГУЭС, 2001. – 279 с.
3. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества: Учеб. пособие для студентов вузов [Текст] / А.И. Половинкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
4. Кравченко П.Д., Яблоновский И.М. Сравнение конструктивных схем машин перегрузочных с жестким и гибким подвесом исполнительного органа [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский // Машиностроение и техносфера XXI века / сборник трудов XIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-16 сентября 2006 г. В 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2006. Т. 2. – 324 с.
5. Пат. 2319236 Российская Федерация МПК С1 G21С 19/00 Устройство перегрузки топливных элементов в ядерном реакторе перегрузочными машинами с гибким подвесом объектов [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М.Яблоновский, В.С. Магальясов (РФ); заявитель и патентообладатель «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса (ЮРГУЭС)–2006119869/06; заявл. 06.06.2006; опубл. 10.03.2008 Бюл. №7.
6. Пат. 2319234 Российская Федерация С1 МПК G21С 3/00 Подвесное автоматическое устройство поворота крышки гермопенала [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский (РФ) заявитель и патентообладатель «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса (ЮРГУЭС)–2006112706/06; заявл. 17.04.2006; опубл. 10.03.2008 Бюл. №7.
7. Кравченко, П.Д. и др. Теоретическое обоснование работоспособности подвесного устройства для поворота пробки пенала в реакторе типа ВВЭР [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский, В.А. Нарыжный // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2007. – №4. – С. 53–58.
8. Яблоновский И.М. Вероятностный анализ безопасности машины перегрузочной канатной для реакторов типа ВВЭР [Текст] / И.М. Яблоновский // Тяжелое машиностроение. – 2008. – №3. – С. 5–8.
9. Шиянов А.И., Герасимов М.И., Муравьев И.В. Системы управления перегрузочных манипуляторов атомных электростанций с ВВЭР [Текст] / А.И. Шиянов, М.И. Герасимов, И.В. Муравьев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 176 с.

### REFERENCES

- [1] Panasenko N.N., Bozhko S.G. Seysmostoykie poemno-transportnye mashiny atomnykh stantsiy [Aseismic hoist transport vehicles of nuclear power plants]. Krasnoyarsk. Pub. Krasnoyarskogo universiteta [Publishing house of Krasnoyarsk university], 1987. 208 p. (in Russian)
- [2] Kravchenko P.D., Dudchenko A.N., Naryzhnyy V.A. etc. Proektirovanie nestandartnogo oborudovaniya. Tyazheloe i atomnoe mashinostroenie [Design of the non-standard equipment. Heavy and atomic mechanical engineering]: monografiya [monograph]. Shakhty. Pub. YuRGUES [Southern Russian state university of economy and service], 2001, 279 p. (in Russian)
- [3] Polovinkin A.I. Osnovy inzhenernogo tvorchestva: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov [Bases

- of engineering creativity. Manual for students of higher education institutions]. M. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1988. 368 p. (in Russian)
- [4] Kravchenko P.D., Yablonovskiy I.M. Sravnenie konstruktivnykh skhem mashin peregruzochnykh s zhestkim i gibkim podvesom ispolnitel'nogo organa [Comparing of constructive diagrams of machines overload with a rigid and flexible suspension of executive body]. Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka [Mechanical engineering and technosphere of the 21st century]: sbornik trudov XIII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii v g. Sevastopole 11-16 sentyabrya 2006 g. [the collection of works XIII of the international scientific and technical conference in Sevastopol on September 11-16, 2006.] V 5-ti tomakh [in 5 volumes]. Donetsk. Pub. DonNTU [Donetsk national technical university], 2006. Vol. 2. 324 p. (in Russian)
- [5] Kravchenko P.D., Yablonovskiy I.M., Magalyasov V.S. (RF). Patent 2319236 Rossiyskaya Federatsiya MPK C1 G21C 19/00. Ustroystvo peregruzki toplivnykh elementov v yadernom reaktore peregruzochnymi mashinami s gibkim podvesom obektov [The patent 2319236 the Russian Federation MPK C1 G21C 19/00 the Device of an overload of fuel elements in a nuclear reactor by overload machines with a flexible suspension of objects]. Zayavitel i patentoobladatel «Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet ekonomiki i servisa (YuRGUES) 2006119869/06 [the applicant and the patent holder "The southern Russian state university of economy and service (SRSUES) – 2006119869/06]; zayavl [stated]. 06.06.2006; opubl [published]. 10.03.2008. Byul [bulletin]. №7. (in Russian)
- [6] Kravchenko P.D., Yablonovskiy I.M. (RF). Patent 2319234 Rossiyskaya Federatsiya S1 MPK G21C 3/00 Podvesnoe avtomaticheskoe ustroystvo povorota kryshki germopenala. Zayavitel i patentoobladatel «Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet ekonomiki i servisa (YuRGUES) [The patent 2319234 of Russian Federation C1 MPK of G21C 3/00 the Suspension automatic device of turn of a cover germopenat. The applicant and the patent holder "The southern Russian state university of economy and service (SRSUES) – 2006119869/06] – 2006112706/06; zayavl [stated]. 17.04.2006; opubl [published]. 10.03.2008. Byul [bulletin]. №7. (in Russian)
- [7] Kravchenko P.D., Yablonovskiy I.M., Naryzhnyy V.A. Teoreticheskoe obosnovanie rabotosposobnosti podvesnogo ustroystva dlya povorota probki penala v reaktore tipa VVER [Theoretical reasons for operability of the suspension device for turn of cork of a case in the PWR reactor]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical science]. 2007, №4, ISSN 0321-2653, pp. 53-58 (in Russian)
- [8] Yablonovskiy I.M. Veroyatnostnyy analiz bezopasnosti mashiny peregruzochnoy kanatnoy dlya reaktorov tipa VVER [The probable analysis of safety of the machine overload rope for PWR reactors]. Tyazheloe mashinostroenie [heavy engineering]. 2008, №3, ISSN 1024-7106, pp. 5–8. (in Russian)
- [9] Shiyayev A.I., Gerasimov M.I., Muravev I.V. Sistemy upravleniya peregruzochnykh manipulyatorov atomnykh elektrostantsiy s VVER [Management systems of overload pointing devices of nuclear power plants with PWR reactor]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1987, 176 p. (in Russian)

### **Problem of Transport Technology Equipment Improving in Nuclear Engineering Using Reloading Machine as an Example**

**P.D. Kravchenko\*, A.D. Maliarenko\*\***

\* *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University “MEPhI”,  
73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360  
e-mail: oni-viti@mephi.ru*

\*\* *Department "Trade and Advertising Equipment", Belarusian National Technical University "BNTU",  
18a building, 65 Nezavisimosty Ave, Minsk, Belarus, 220013  
e-mail: amalyar55@mail.ru*

**Abstract** –The problem of longstanding use of cumbersome complicated transport technology equipment using the example of the reloading machine with rigid telescopic elements for PWR nuclear reactors is considered in article. New simplified construction of reloading machine with rope type hang of automatic grasp device is offered, which led to decrease of construction weight, number of elements and to increase the level of safety.

**Keywords:** reloading machine, nuclear engineering, working rod, rope hang, heuristic method, design, NPP.