

Морской плавучий ветропарк



П. М. Радченко,
канд. техн. наук,
профессор кафедры
электрооборудования судов
Морского государственного
университета (МГУ)
им. адм. Г. И. Невельского

Прибрежная морская акватория, прилегающая к промышленно развитым городам, населенным пунктам и технопаркам, включая бурно развивающиеся разработки нефти, газа и полезных ископаемых на континентальном шельфе, морском склоне и океаническом ложе, является идеальной площадкой для размещения морских промышленных электростанций. Они основаны на использовании возобновляемых источников энергии разной физической природы – ветра, волн, морских и приливных течений, солнца, разности температур морской воды – мощностью в несколько десятков, сотен и тысяч мегаватт.

При примером могут служить проекты плавучих ветровых электростанций (ВЭС), планируемых к размещению в море к северо-востоку от г. Фукусима (Япония) и в Средиземном море (о. Мальта). Их мощности будут составлять сотни мегаватт.

Размещение ВЭС на морской акватории имеет следующие преимущества:

- повышается производительность ветроустановок (над поверхностью моря дуют более сильные ветры) и качество энергии, подаваемой в энергосистему региона (структура морского ветра более равномерна);
- не требуется отчуждения земельных угодий и сооружения дорогостоящих подъездных дорог в труднодоступных местах (лес, горы, болота и пр.);
- для местного населения становятся менее явными экологические последствия: изменение привычного окружающего ландшафта, шумовые эффекты, вибрация почвы, создание помех сотовой связи, радио- и телевещанию;
- мобильность;
- высокая ремонтпригодность и простота утилизации по окончании срока службы.

Развиваются две разновидности морских ВЭС: в стационарном с опорой

на морское дно и плавучем исполнении (рис. 1). В странах Северной Европы предпочтение отдается морским стационарным ветропаркам или ветрофермам (ВЭП и ВЭФ), размещаемым на расстоянии 5–20 км от береговой черты на глубинах моря до 30 м. На больших глубинах стационарное исполнение ВЭП становится нерентабельным из-за дорогостоящих фундаментов, и ему на смену приходят плавучие аналоги, основанные на полупогружных технологиях с разными способами позиционирования. Оба исполнения ВЭП конструктивно повторяют наземные аналоги, отличаясь только устройством фундаментов и более тщательной защитой от коррозии. Как правило, это двух- или трехлопастные флюгерного типа ветротурбины с горизонтальной осью вращения, смонтированные вместе с генератором на вершине моноблочной опорной башни, имеющей коническую форму и высоту над поверхностью моря, примерно равную диаметру ветроколеса. Единичные мощности наземных ветроэнергетических установок (ВЭУ) в настоящее время составляют 1,5–2,0 МВт. Вынесение их в море за пределы видимости делает возможным и целесообразным увеличение единичных мощностей до 3,0–5,0 МВт. Диаметры ветроколеса и высоты опорных башен этих ВЭУ достигают 100–120 м при таких же размерах подводных оснований (при плавучем исполнении), диктуемых соображениями обеспечения волнустойчивости и надлежащей остойчивости ВЭУ в период штормовых ветров.

ВЭП с суммарными мощностями в десятки и сотни мегаватт, образуемые из множества однотипных ветромодулей, снабженных автономным полупогружным основанием у каждого, становятся, в свою очередь, нерентабельными. Эта задача решается положительно

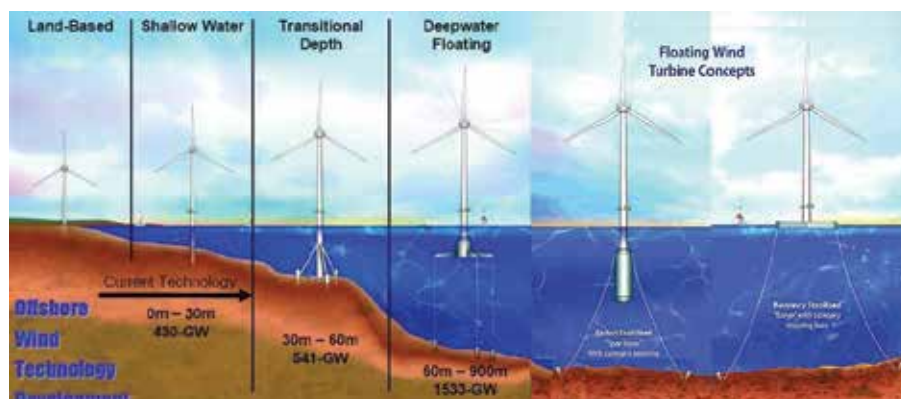


Рис. 1. Влияние глубин моря в месте установки ВЭУ на способ ее размещения и монтажа

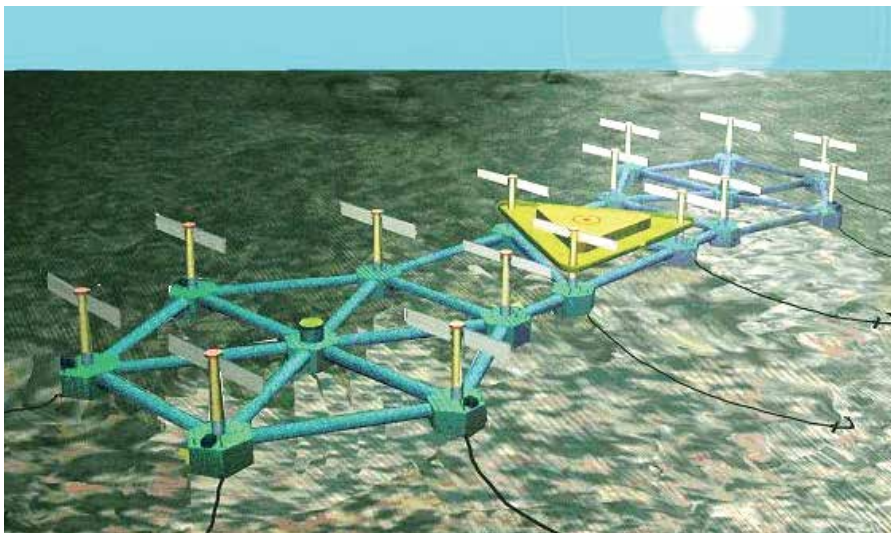


Рис. 2. Общий вид многоагрегатного плавучего полупогружного ветропарка с якорным способом позиционирования

лишь в том случае, когда все ветромодули ВЭП размещаются на одном общем полупогружном основании-понтоне.

Один из первых проектов многоагрегатного плавучего ветропарка (МПВП) с подобным способом размещения суммарной мощностью 15–30 МВт был предложен в МГУ им. адмирала Г. И. Невельского [1].

МПВП представляет собой выстроенное вдоль береговой черты в одну или несколько параллельных цепей и удерживаемое якорями многозвенное полупогружаемое плавучее сооружение, одно звено которого показано на рис. 2. Это звено содержит подводную ферму-понтон (1) (рис. 3), на которую опираются колонны ветромодулей (2) и надводная площадка (3) с надстройкой (4), расположенные в средней (миделевой) части звена МПВП.

Погружаемый понтон (1) ферменной конструкции образован двумя многоугольными, в частном случае шестиугольными, фигурами (5) и (5') и одной, в частном случае треугольной, фигурой (6). Диаметры окружностей, описанных вокруг этих фигур, и расстояние между центрами этих окружностей составляют несколько сотен метров. Вершины многоугольных и треугольной фигур понтона выполнены в виде угловых полых водоизмещающих поплавков — соответственно (7), (7'), соединенных по периметру фигур полыми межпоплавковыми ребрами жесткости — соответственно (8), (8'), называемых периметрическими. Расстояния между центрами водоизмещающих поплавков вычисляется исходя из соображений восстановления структуры ветрового потока перед ветромодулями, находящимися в ветро-

вой тени других ветромодулей. Опытным путем определено, что это расстояние должно составлять примерно 2–3 диаметра ветротурбины.

Угловые поправки смежных сторон многоугольных и треугольной фигур соединены линейными ребрами жесткости (9). Для придания жесткости всей ферменной конструкции в центре каждой многоугольной и треугольной фигур установлены центральные поправки — соответственно (12), (12'), которые связаны радиальными ребрами жесткости (14), (14'):

- у многоугольных фигур (5) и (5') с угловыми поправками (7) и (7');
- у треугольной фигуры (6) с ее периметрическими ребрами жесткости (не показаны).

С целью снижения массы и металлоемкости фермы-понтон (1) диаметр всех ребер жесткости составляет от одной трети до половины высоты его угловых (7), (7') и центральных (12), (12') водоизмещающих поплавков. Линейные и периметрические ребра жесткости многоугольных фигур выполнены водопроницаемыми, а радиальные ребра жесткости всех фигур и периметрические ребра жесткости треугольной фигуры — герметичными. Герметичные ребра жесткости служат средствами сообщения между всеми поплавками МПВП, в которых расположены производственные помещения.

Угловые водоизмещающие поправки (7), (7') служат фундаментными основаниями для опорных башен (16) ветромодулей (2), а центральные поправки (12), (12') — для размещения вспомогательных механизмов и систем

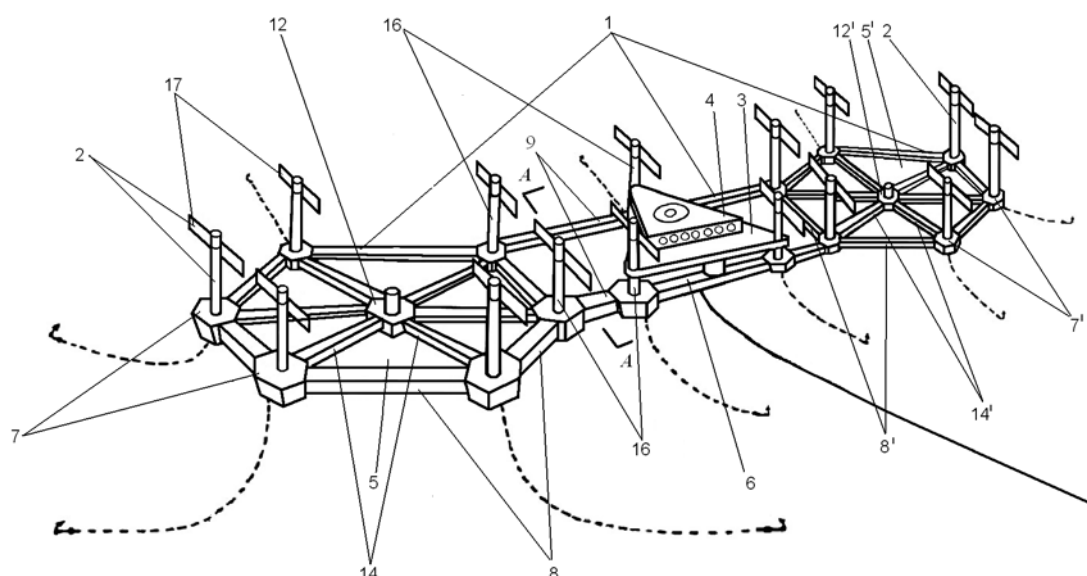


Рис. 3. Архитектура многоагрегатного плавучего полупогружного ветропарка



Рис. 4. Морской ветропарк, оборудованный ветротурбинами с вертикальной осью вращения

МПВП. Центральный поплавок (не показан) треугольной фигуры (6) является одновременно опорным фундаментом для надводной площадки (3) с ее надстройкой (4).

Ветромуль (ветроэлектрический преобразователь) (2) (рис. 3) представляет собой ветротурбину (17) с вертикальной осью вращения (показана в упрощенном виде), опирающуюся через невысокую цилиндрикоконическую башню (16) на понтон-поплавок (7).

В пользу ветромодулей с вертикальной осью вращения можно привести следующие аргументы.

Во-первых, вертикально-осевые ветротурбины (ВОВТ) имеют умеренно-высотные опорные башни, которые компромиссно разрешают проблемы производительности ВЭП и сохранения его устойчивости при штормах, а также создают умеренные по массе нагрузки на несущие понтонные основания в сравнении с высотно-башенными ветроустановками, имеющими горизонтально-осевые ветротурбины (ГОВТ).

Во-вторых, расположение ветрогенератора у ВОВТ в основании опорной башни позволяет выбрать для них малооборотные генераторы с высоконадежной безмультипликаторной трансмиссией, а также снять трудноразрешимые в морских условиях вопросы эксплуатации оборудования, размещаемого у ГОВТ внутри гондолы на высоте 70–120 м.

В-третьих, ВОВТ не прекращают работу при скоростях ветра вплоть до 40 м/с, тогда как ГОВТ необходимо выключать уже при 24–25 м/с.

В-четвертых, ВОВТ характеризуются меньшими предельными частотами вращения по сравнению с ГОВТ, что делает их менее опасными для птиц, снижает аэродинамические шумы, уменьшает влияние на теле-, радио- и сотовую

связь, а при выполнении расчетов на предельные нагрузки снижает вводимые запасы прочности, а следовательно — металлоемкость и стоимость ветроустройства. Внешний вид МПВП такого исполнения в рабочем положении представлен на рис. 4.

Вал генератора вертикального исполнения соединен с валом ветротурбины (17) (рис. 3) посредством промежуточного вала напрямую, без применения мультипликатора. Простая кинематика в сочетании с синхронным генератором, снабженным постоянными магнитами, обеспечивает высокую надежность ветромодулей, повышает их КПД и снижает эксплуатационные расходы. Тихоходный ветрогенератор снабжен системой принудительного воздушного охлаждения.

Для повышения льдоустойчивости всего сооружения в период ледостава и ледохода (при размещении на замерзающих акваториях) поплавок-понтон (7) имеет форму усеченной пирамиды, опрокинутой вершиной вниз. При такой форме граней понтонов в период подвижки льдов возникают силы раскалывания ледяного покрова [1]. Тем же целям служит смещение всех межпоплавокных ребер жесткости — периметрических, радиальных, линейных — к верхней кромке бортов-граней угловых (7), (7') и центральных (12), (12') поплавков-понтонных. Перед ледоставом МПВП всплывает до зимней ватерлинии, которая соответствует половине высоты указанных поплавков. В таком положении МПВП вмораживает в лед, и все ребра жесткости оказываются выше поверхности ледяного покрова. Общая поверхность вмораживающей в лед части ветропарка существенно уменьшается, соответственно снижается и напор ледяных полей на ферму-понтон (1) в период ледохода.

На верхней палубе отдельных поплавок-понтонных (7), (7') со стороны их внешних бортов расположены герметичные рубки, в которых установлены электроприводные брашпили. Их приводные валы выведены к якорным звездочкам, размещенным снаружи рубки, через водонепроницаемые уплотнения. При использовании мертвых якорей брашпили отсутствуют.

Центральные поплавок-понтонные (12), (12') многоугольных и треугольной фигур фермы-понтонной (1) и надстройка (4) разделены на обслуживающие помещения: производственные и служебные. В производственных помещениях размещены инверторно-трансформаторное оборудование, главный распределитель электроприемников собственных нужд, центральный пост управления (ЦПУ), механическая и электромеханическая мастерские и др. На крыше надстройки предусмотрена площадка для вертолета.

Надводная площадка защищена по периметру леерным ограждением, оборудована причальным сооружением и грузоподъемным устройством для операций с тяжеловесными грузами.

Электроэнергия, произведенная ветрогенераторами на переменном токе переменной частоты при напряжении 0,66–10,0 кВ, преобразуется посредством выпрямителей в постоянный ток, суммируется на сборных шинах постоянного тока, затем преобразуется повторно посредством инвертора в переменный ток стабильной промышленной частоты. После этого напряжение повышается трансформатором до 35–110 кВ и передается на подстанцию береговой энергосистемы. До повышающего трансформатора, установленного на МПВП в надстройке (4), передача электроэнергии производится по морским кабелям (сухим) обычной конструкции, проложенным по сухим пешеходным коммуникациям фермы-понтонной (1), а после повышающего трансформатора — по морскому подводному кабелю специальной конструкции, проложенному по морскому дну в специальных траншеях или защитных трубопроводах.

В темное время суток и при плохой видимости МПВП может представлять опасность для морских и воздушных судов. По этой причине ветропарк должен быть оборудован комплектом сигнально-опознавательных средств, требуемых для неподвижных плавучих объектов. Эти средства, как известно,

относятся к электроприемникам ответственного назначения. К ним же относят и средства оживления МПВП при вводе его в действие, в частности — комплексную систему автоматического управления, контроля и аварийно-предупредительной сигнализации технического состояния оборудования МПВП. Указанные электроприемники резервируются аварийным источником энергии — аккумуляторной батареей.

Расчетные технические характеристики МПВП:

- диапазон рабочих скоростей ветра, м/с — 5–40;
- номинальная скорость, м/с — 15;
- предельная скорость ветра, м/с — 55;
- номинальная мощность звена ВЭП, МВт — 15–30;
- номинальная мощность ветромодуля, МВт — 1–2;
- тип ветротурбины — с вертикальной осью вращения;
- тип ветрогенератора — синхронный, с постоянными магнитами, малооборотный;
- наибольшая осадка при высоте волны 5 м, м — 7,5;
- способ позиционирования — якорный;
- способ передачи энергии на объект — посредством морского кабеля;
- удаленность от берега, км — 2,0–30,0;
- способ управления — автоматический;
- режимы работы: а) автономный; б) в параллель с береговым источником;
- удельная стоимость, долл/кВт — 1500–1600;
- себестоимость ветровой энергии, цент/кВт·ч — 5–6;

- глубина стоянки, м — до 700;
- экономическая эффективность — согласно рис. 5.

Применяя каскад аналогичных звеньев-ветропарков, размещенных вдоль береговой черты, можно создать ветроэлектростанцию номинальной мощностью в несколько десятков, сотен и тысяч мегаватт.

МПВП используют следующим образом.

После 100%-ной сборки отдельных многоугольных (5), (5') и треугольной фигур фермы-понтон (1) (рис. 3) на стапелях судовой верфи их доставляют по частям в надводном положении с помощью буксира на место будущей стоянки, к которой уже проложен морской подводный кабель. Отбуксированные части фермы-понтон (1) соединяют друг с другом в звено посредством шарниров с несколькими степенями свободы. Затем МПВП позиционируют с помощью буксиров относительно подводного кабеля, и после его сращивания с кабельным вводом щита трансформаторной подстанции МПВП последний закрепляют на якорях.

Гибкое подвижное соединение нескольких звеньев МПВП на шарнирах позволяет им смещаться относительно друг друга, когда МПВП находится в надводном положении на сильной волне, а также в процессе его погружения-всплытия, если балластные отсеки разных звеньев заполняются или осушаются неравномерно. Тем самым исключается возникновение недопустимых перенапряжений в узлах сопряжения разных частей МПВП.

На этом монтажные работы завершаются, и МПВП переводят в рабочее (полупогруженное) положение в

автоматическом или ручном режиме управления, для чего по команде из ЦПУ открывают одновременно приемные кингстоны во всех угловых (7), (7') и центральных (12), (12') поплавках-понтонках, а также их уравнильные воздушные клапаны. Заборная вода самотеком заполняет балластные отсеки указанных поплавков-понтонков. За ровным креном и дифферентом МПВП следит подсистема автоматического контроля и управления креном и дифферентом. В случае неравномерного поступления воды в поплавки-понтонки эта система регулирует степень открытия их приемных кингстонов, выдерживая строго горизонтальное положение МПВП. Этим исключается возникновение местных перенапряжений в узлах сопряжения многоугольных фигур и обеспечивается строго перпендикулярное положение лопастей ветротурбин (17) ветромодулей (2) МПВП к направлению ветровых потоков, при котором производительность последних при текущих условиях максимальна. После погружения понтонков по летнюю ватерлинию приемные кингстоны и уравнильные воздушные клапаны закрывают и подают разрешение на ввод ветромодулей (2) в рабочий режим.

При повышении скорости ветра до наименьшего рабочего значения V_{\min} ветротурбины (17) растормаживают, и они начинают вращать синхронные ветрогенераторы с переменной частотой, пропорциональной текущей скорости ветра. Последние, возбуждаясь от постоянных магнитов, наводят в якорных обмотках электродвижущую силу (ЭДС) переменной частоты. Номинальное значение напряжения ветрогенераторов при номинальной скорости ветра принимают в зависимости от единичной их мощности равным одному из стандартных значений в диапазоне от 0,69 до 10,3 кВ.

Электроэнергия, произведенная каждым ветрогенератором, подается с их якорных обмоток на управляемые выпрямители, выполненные на полупроводниковых приборах. После выпрямления электроэнергия всех ветрогенераторов суммируется на сборных шинах постоянного тока суммирующих щитов каждой многоугольной фигуры (5), (5') фермы-понтон (1) МПВП. Суммарный постоянный ток каждой многоугольной и треугольной фигур инвертируется посредством независимого трехфазного мостового инвертора в переменный ток



Рис. 5. Динамика показателей экономической эффективности ветроэлектрических установок (по материалам зарубежной печати)

Освоение шельфа

промышленной частоты и подается на одну из трех первичных обмоток четырехобмоточного повышающего трансформатора. В зависимости от параметров местной береговой энергосистемы напряжение на вторичной стороне трансформатора следует выбирать равным одному из стандартных значений: 10; 35 или 110 кВ.

Полезно заметить, что, помимо своего прямого назначения — производство электроэнергии, — МПВП заметно оздоравливает окружающую среду региона, в котором его размещают. Во-первых, снижая нагрузку на местную тепловую электростанцию, МПВП способствует уменьшению загрязнения окружающей среды: воздушной и водной. Во-вторых, плавучие ВЭП могут использоваться одновременно для реабилитации прибрежных акваторий, отравляемых промышленными и канализационными стоками. Для этого каждый ветромодуль ВЭП дополнительно оборудуют воздухоподогревателями, подающими атмосферный воздух в придонные обедненные кислородом слои. Тем самым будут активизироваться естественные аэробные процессы биологической очистки воды.

Улучшение ее светопрозрачности в условиях избытка кислорода вызовет интенсивный рост подводной растительности и создаст условия для развития марикультуры. Обилие корма, в свою очередь, обусловит миграцию в этот район морских животных и рыб.

Чтобы уничтожить содержащиеся в воде болезнетворные микроорганизмы, подаваемому воздуху можно придать бактерицидные свойства. Для этого его следует подвергнуть дополнительной обработке, пропустив через озонирующую установку, входящую в комплект системы аэрации. Чередуя по определенной программе подачу в придонные слои воды обычного атмосферного и озонированного воздуха, можно не только нейтрализовать болезнетворные микроорганизмы, но и ускорить окислительные процессы минерализации донной органики, так как озон обладает еще и каталитическими свойствами. Более подробно о реабилитационных, рекреационных и репродуктивных свойствах ВЭП изложено в [2].

Размещение ВЭП в море снимает ряд проблем, препятствующих их широкому промышленному применению. При глубинах на морском шель-

фе, превышающих 20–30 м, плавучие ВЭП предпочтительнее стационарных. Их волноустойчивость, ледостойкость и остойчивость при штормовых ветрах обеспечиваются за счет применения полупогружных технологий. Прибрежные плавучие полупогружные ВЭП удерживаются якорями, преобразуют энергию ветра в электрическую и передают ее на берег по морскому подводному кабелю. Для усиления положительного экологического эффекта целесообразно использовать ВЭП как средство реабилитации атрофированных водоемов. **Т**

Литература:

1. Патент 2258633, Россия, МПК6 В63 В 35/44, F03 D 9/00, 7/00. Многоагрегатная плавучая полупогружная ветроферма / П. М. Радченко (Россия). № 2002113470; Заявл. 23.05.2002; Оpubл. 20.08.2005; Бюл. № 25 // Открытия, изобретения. 2005. № 25.
2. Радченко П. М., Радченко И. П. Реабилитационные, рекреационные и репродуктивные функции морских ветроэнергетических установок // Матлы Междунар. науч.-техн. конф. «Морская экология – 2005». Т. 1. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2005. С. 156–162.

« Т Р А Н С П О Р Т Р Ф » КУПОН НА ПОДПИСКУ

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ! Для оформления подписки на журнал просим заполнить настоящий бланк и выслать по адресу 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9.

После получения купона мы отправим вам счет. Оплатив его, отправьте в редакцию копию платежного поручения по факсу (812) 310-40-97. Поля, обязательные для заполнения, отмечены звездочкой (*).

Наименование предприятия *	<input type="text"/>		
Адрес доставки (фактический) *	<input type="text"/>		
Тел. <input type="text"/>	Факс * <input type="text"/>	E-mail * <input type="text"/>	
Фамилия, имя, отчество *	<input type="text"/>		
должность <input type="text"/>			
Юридический адрес *	<input type="text"/>		
ИНН * <input type="text"/>	КПП * <input type="text"/>		
Название банка *	<input type="text"/>		
Расчетный счет *	<input type="text"/>		
Корреспондентский счет *	<input type="text"/>	БИК * <input type="text"/>	

2013 г. *

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
№1	№2	№3	№4	№5	№6

Количество экземпляров *

СТОИМОСТЬ ОДНОГО ЭКЗЕМПЛЯРА (БЕЗ УЧЕТА СТОИМОСТИ ДОСТАВКИ) — 805 Р., НДС НЕ ОБЛАГАЕТСЯ