

Исполнительные механизмы СУЗ РБМК (Общие представления по ИМ, основные требования при проектировании, принципиальные схемы ИМ СУЗ РБМК, основные технические характеристики)

1.1 Место ИМ в СУЗ

СУЗ – совокупность средств технического, программного, информационного обеспечения, предназначенная для обеспечения безопасного протекания цепной реакции.

СУЗ включает:

- Контролирующую часть (датчики мощности, технологических параметров, аппаратура обработки сигналов и пр.);
- Электронно-логическая часть – обработка сигналов и выдача исполнительных воздействий;
- Исполнительная часть – совокупность устройств, обеспечивающих непосредственное воздействие на реактивность;
- Обеспечивающая часть – системы охлаждения, электропитания и пр.

1.2 Основные термины и определения по ИМ СУЗ

Исполнительный механизм СУЗ – устройство, состоящее из привода, рабочих органов и соединительных элементов, предназначенное для изменения реактивности активной зоны реактора.

Привод СУЗ – устройство, предназначенное для изменения положения механического рабочего органа СУЗ.

Рабочий орган СУЗ - средство воздействия на реактивность, используемое в СУЗ.

1.3 Требования при проектировании ИМ СУЗ

Поскольку ИМ СУЗ предназначены для обеспечения нормальной эксплуатации реактора и остановки реактора при нарушении нормальной эксплуатации реактора, т.е. относятся к элементам важным для безопасности, то при разработке как конструкции ИМ в целом, так и его составных частей (СП, рабочий орган) необходимо выполнить (реализовать) следующие функциональные требования:

- Обеспечить перемещение рабочих органов в нормальных эксплуатационных режимах с определенной скоростью как при вводе в зону, так и при выводе из зоны;
- Обеспечить необходимое быстродействие (время ввода, скорость) и эффективность рабочих органов, достаточные для перевода активной зоны реактора в подкритическое состояние без нарушения пределов безопасной эксплуатации при нарушениях нормальной эксплуатации;
- Перемещение рабочих органов должно осуществляться свободно, без заеданий и затирааний, т.е. должна быть обеспечена и обоснована высокая проходимость рабочих органов;
- Перемещение рабочих органов в зону в аварийных режимах должно осуществляться так, чтобы начавшееся защитное действие выполнялось полностью и обеспечивался контроль выполнения функций аварийной защиты;

- Обеспечить контроль положения рабочего органа в пределах всего установленного рабочего хода и ограничивать движение рабочего органа в крайних конечных положениях с выдачей оператору на БЦУ о положении стержня и сигнализацией крайних конечных положений;
- Обеспечивать удержание рабочего органа в любом промежуточном положении, включая крайние конечные положения и осуществлять срабатывание рабочего органа по аварийному сигналу из любого промежуточного положения;
- Исключать самопроизвольное перемещение рабочего органа в сторону положительной реактивности;
- Выполнение функций аварийной защиты не должно зависеть от наличия и состояния источников энергопитания.
- При вводе рабочего органа должен быть исключен обратный ход реактивности, т.е. на любом участке движения обеспечивался отрицательный ввод реактивности.

Требования по надежности - сохранение работоспособности в течение определенного времени и/или при наработке определенного количества циклов (перемещений). А это и обеспечение прочности конструктивных элементов, совместимости конструкционных и поглощающих материалов, коррозионной стойкости, стойкости к тепловым, радиационным и механическим воздействиям в условиях эксплуатации и прочее.

Все эти требования изложены в следующих главных нормативно-технических документах по ядерной безопасности:

- “Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций” ПБЯ РУ АС-89;
- “Общие положения обеспечения безопасности атомных станций” ПНАЭ Г-1-011-89 (ОПБ-88/97);
- “Правила устройства и безопасной эксплуатации исполнительных механизмов органов воздействия на реактивность” ПНАЭ Г-7-013-89;

Как конкретно реализовать вышеизложенные требования с учетом конкретного типа реактора, условий эксплуатации, габаритов – это задача конструктора. Более того, конструктор должен еще и обосновать, что разработанная им конструкция соответствует этим требованиям (теоретически, на экспериментальных стендах, в реакторе). Для этого требуются знания и в области механики, физики, теплогидравлики, сопротивления материалов и пр. МВТУ и прежде всего кафедра для этого дает достаточно хорошую базу.

1.4 Состав

В составе СУЗ реакторов РБМК используются следующие типы исполнительных механизмов (рисунок 1):

- исполнительные механизмы аварийной защиты, предназначенные для заглушения реактора в аварийных ситуациях;
- исполнительные механизмы ручного регулирования - ИМ РР;
- исполнительные механизмы автоматического регулирования - ИМ АР;
- исполнительные механизмы укороченного стержня - поглотителя - ИМ УСП.

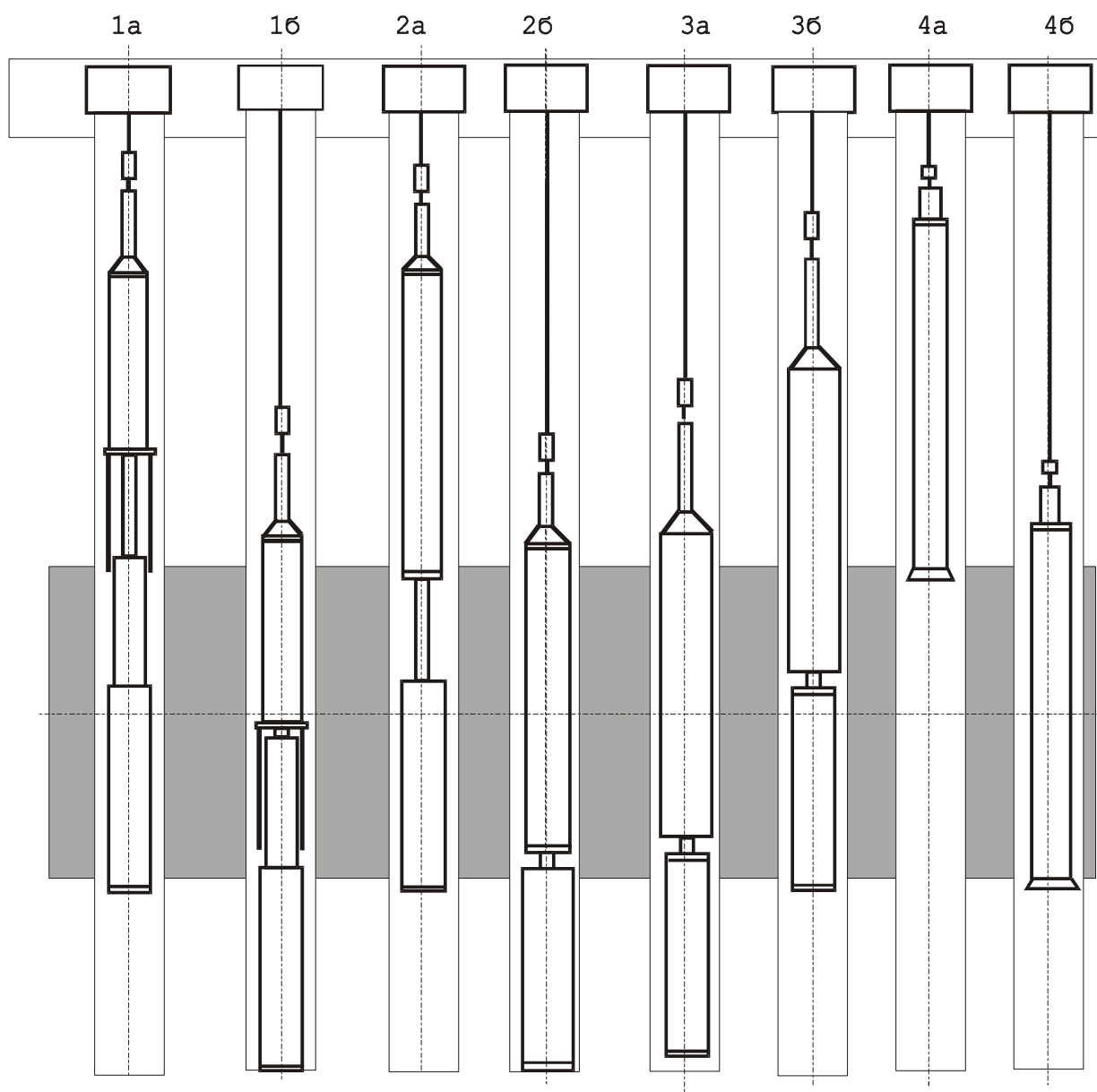


Рисунок 1- Схема расположения ИМ СУЗ по высоте активной зоны

- 1а-Стержень ИМ РР 2477.00.000-01-исходное (верхнее) положение
 1б-Стержень ИМ РР 2477.00.000-01- нижнее положение
 2а-Стержень ИМ АР,ЛАР,РР 2091.00.000-01- исходное (верхнее) положение
 2б-Стержень ИМ АР,ЛАР,РР 2091.00.000-01 - верхнее положение
 3а-Стержень ИМ УСП 2093.00.000 -исходное (нижнее) положение
 3б-Стержень ИМ УСП 2093.00.000 -верхнее положение
 4а-Стержень ИМ БАЗ 2505.00.000-01 -исходное (верхнее) положение
 4б-Стержень ИМ БАЗ 2505.00.000-01 -нижнее положение

Каждый исполнительный механизм включает сервопривод, стержень-поглотитель и дополнительные сборочные единицы (защитная пробка от прострельного радиационного излучения, аварийный демпфер, опора и пр.).

1.5 Назначение

ИМ АЗ выполняют функцию аварийной защиты реактора и обеспечивают в аварийных ситуациях быстрый ввод в зону стержней АЗ.

При нормальной эксплуатации реактора стержни АЗ расположены над активной зоной.

ИМ РР предназначены для компенсации реактивности.

ИМ АР предназначены для автоматического регулирования и поддержания мощности.

ИМ УСП обеспечивают ввод стержня в активную зону снизу вверх для выравнивания высотного энергораспределения.

Исполнительные механизмы РР, АР и УСП также выполняют функции остановки реактора и поддержания реактора в подкритическом состоянии.

1.6 Устройство и работа ИМ

1.6.1 Органы регулирования

Стержни СУЗ располагаются и перемещаются в вертикальных каналах СУЗ с внутренним диаметром на участке активной зоны 82 мм.

Охлаждение канала СУЗ, расположенных внутри него стержня и элементов конструкции ИМ, а также окружающих канал графитовых колонн осуществляется водой автономного гидравлического контура СУЗ (КО СУЗ), которая циркулирует через канал сверху вниз. При этом обеспечивается полное заполнение канала водой, что достигается соответствующим дросселированием слива и выбранным диапазоном расходов воды.

Эксплуатация стержня БАЗ осуществляется в канале СУЗ с пленочным водяным охлаждением канала на участке активной зоны под стержнем. Формирование пленочного режима охлаждения обеспечивается пленкообразователем, установленным на нижнем конце стержня.

Охлаждение стержня БАЗ осуществляется водой КО СУЗ, заполняющей кольцевой зазор между стержнем и каналом по всей высоте стержня (см. табл. 2.1).

Для удаления радиолитических газов, поступающих в газовую подстержневую полость, введена вентиляция канала азотом от азотно-газового контура. Давление в газовых полостях канала близко к атмосферному.

Поскольку вода является достаточно сильным поглотителем нейтронов, то для уменьшения положительного эффекта реактивности при обезвоживании каналов СУЗ и снижения "паразитного" поглощения нейтронов приняты необходимые меры по снижению количества воды в активной зоне с сохранением надежного охлаждения канала с размещенным в нем поглощающим стержнем.

В конструкции стержней СУЗ (2091.00.000-1, 2477.00.000-01 и 2093.00.000) это достигается использованием механических вытеснителей, которые связаны с поглотителем стержня.

Таким образом, при выводе поглотителя стержня из зоны его место на участке активной зоны занимает вытеснитель, вытесняющий "лишнее" количество воды из активной зоны как "паразитного" поглотителя.

В конструкции стержня БАЗ механический вытеснитель отсутствует. Он заменен на газовую полость, ограниченную тонким слоем пленки воды, стекающей по стенкам канала СУЗ.

1.6.2. Стержень АР изд. 2091.00.000-01 состоит из поглотителя и вытеснителя, соединенных телескопической подвеской (рисунок 2).

Поглотитель состоит из семи шарнирно соединенных между собой звеньев. Верхняя часть поглотителя заканчивается несущим звеном, посредством которого осуществляется соединение стержня с лентой сервопривода (СП). Каждое звено поглотителя состоит из наружной трубы (Ф 70 х 2мм) и внутренней трубы (Ф 50 х 2мм), концы которых герметизируются приваркой концевых деталей. В кольцевом зазоре между труб размещаются втулки из карбида бора. Общая длина стержня по поглотителю - 6772мм.

Вытеснитель состоит из четырех шарнирно соединенных между собой звеньев. Верхняя часть вытеснителя заканчивается телескопической подвеской (штоком диаметром 25 мм), опирающейся на упор в нижнем звене поглотителя.

В упоре нижнего звена поглотителя выполнены четыре отверстия (диаметром 10 мм каждое), предназначенные для выхода охлаждающей воды из центральной полости поглотителя.

Каждое из звеньев вытеснителя состоит из трубы наружным диаметром 74мм и толщиной стенки 2,5 мм, концы которой герметизируются приваркой концевых деталей. Звенья вытеснителя частично заполнены графитовыми вкладышами - утяжелителями. Дополнительно графит выполняет роль защиты подреакторного помещения от прострельного радиационного излучения.

В звеньях вытеснителей вкладыши установлены с номинальным радиальным зазором между оболочкой вытеснителя и графитом, равным 1,5 мм и выбранным, исходя из опыта эксплуатации, с учетом возможного распухания графита под действием радиационного облучения.

Концевые детали как звеньев поглотителя, так и звеньев вытеснителя представляют собой элементы байонета (переходник и захват) для шарнирного соединения звеньев.

Фиксация байонетных шарнирных соединений звеньев стержня от разворота осуществляется двумя упорами, полученными вдавливанием части металла в стенке. Наружный захват байонета звеньев стержня имеет пояс с четырьмя направляющими выступами (диаметром 77,5мм), исключающими непосредственное касание оболочек звеньев канала СУЗ и тем самым механические повреждения оболочек при перемещении стержня в канале.

На нижнем конце нижнего звена вытеснителя посредством байонетного соединения закреплен конусный наконечник, на который вытеснитель в крайнем нижнем положении садится на упор в канале в подреакторной зоне. Для обеспечения беспрепятственного прохождения охлаждающей воды через канал при расположении вытеснителя на упоре в конусном наконечнике выполнены 4 отверстия диаметром 10 мм каждое.

Общая длина четырех звеньев вытеснителя составляет ~4560мм при высоте подреакторной зоны, куда убирается вытеснитель при вводе поглотителя в зону, 4250мм. При этом телескопическая подвеска обеспечивает ввод поглотителя в зону на рабочий ход 6550 мм, поскольку она выведена во внутреннюю полость поглотителя и поглотитель имеет возможность свободного перемещения относительно неподвижной подвески.

В качестве конструкционного материала используется высокопрочный алюминиевый сплав САВ 1.

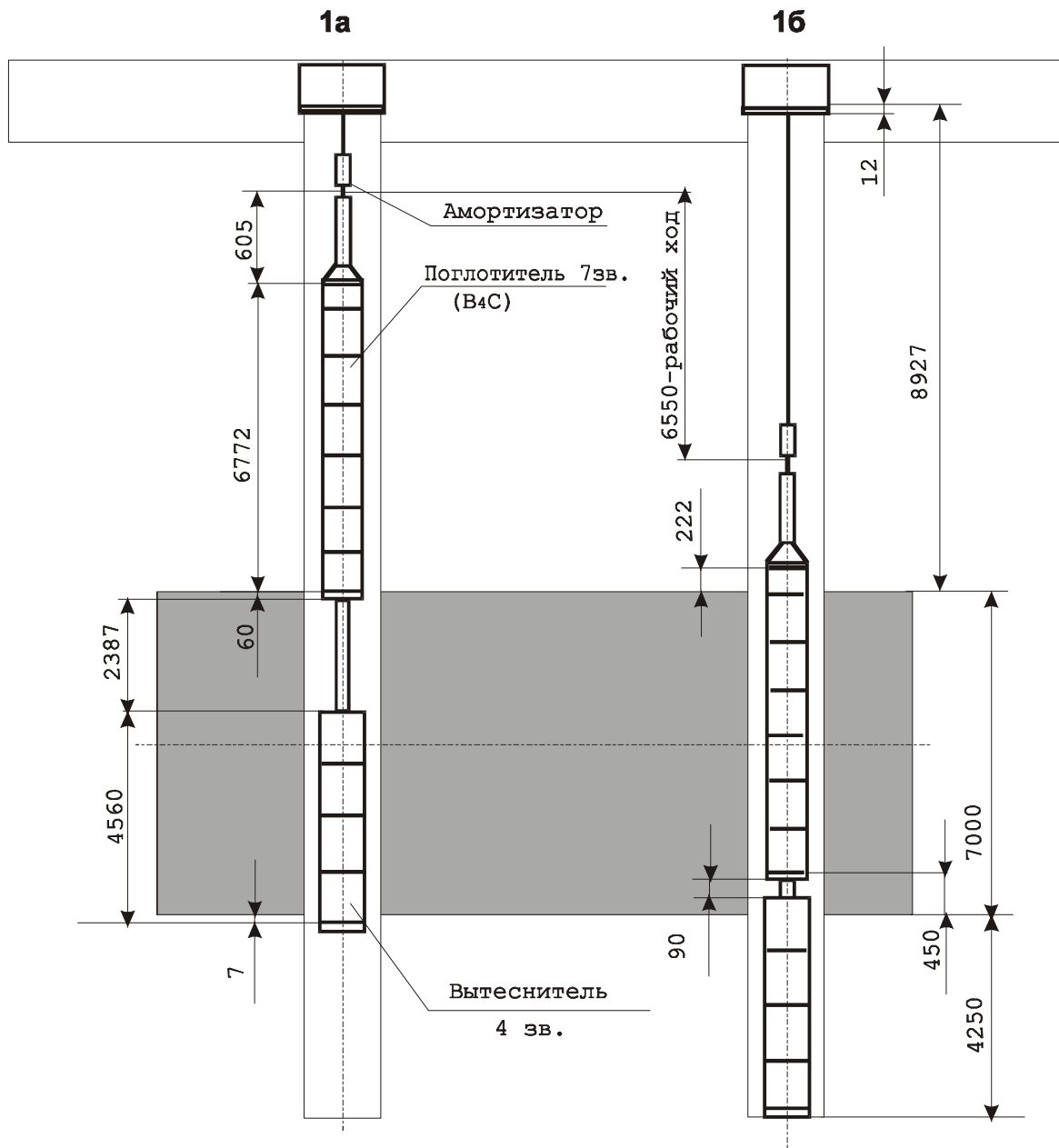


Рисунок 2– Исполнительный механизм АР, РР

1а- стержень в крайнем верхнем положении
 1б- стержень в крайнем нижнем положении

1.6.3 Стержень РР изд. 2477.00.000-01 состоит из двух частей: поглотителя и вытеснителя, соединенных телескопической подвеской (рисунок 3).

Для исключения столбов воды в активной зоне вытеснитель выполнен из шести шарнирно соединенных звеньев общей длиной ~7,1м. При этом четыре нижних звена представляют собой штатные звенья вытеснителя стержня 2091.00.000-01 с диаметром 74мм., а два верхних звена имеют диаметр 70 мм и выполнены из существующих конструктивных элементов стержня 2091.00.000-01. Конструкция и материал звеньев вытеснителя аналогичны конструкции звеньев вытеснителя стержня 2091.00.000-01.

Поглотитель выполнен из пяти шарнирно соединенных звеньев общей длиной по поглотителю ~ 6790 мм. При этом четыре верхних звена представляют собой штатные звенья поглотителя стержня БАЗ изд.2505.00.000 (диаметром по оболочке 74 мм) общей длиной по поглотителю (карбид бора B_4C) 4105мм, а нижнее звено, длиной ~2,6 м, выполнено в виде 18-ти отдельных стальных ленточных полос (толщиной 2,9мм и шириной 11 мм) - поглощающих элементов (ПЭЛ), расположенных по окружности и скрепленных друг с другом равномерно расположенными по высоте ПЭЛ дистанционирующими бандажными кольцами.

Из 18-ти ПЭЛ 14 заполнены поглотителем - порошком титаната диспрозия Dy_2TiO_5 , а четыре ПЭЛ выполнены холостыми, без поглотителя. Диаметр описанной окружности по ленточным ПЭЛ составляет 78,8мм.

Выполненное таким образом нижнее ленточное звено поглотителя имеет возможность перемещаться в кольцевом зазоре между каналом СУЗ и звеньями вытеснителя диаметром 70мм.

При расположении стержня в крайнем верхнем положении поглотитель выведен из зоны (нижний край поглотителя находится на уровне верхнего края активной зоны), а вытеснитель перекрывает всю высоту зоны, исключая столбы воды.

При этом остается лишь кольцевой слой воды в зазоре между каналом и вытеснителем, достаточный для охлаждения стержня и канала СУЗ.

При перемещении стержня в активную зону сначала осуществляется совместное движение поглотителя с вытеснителем. Затем, после того как вытеснитель становится на упор в подреакторной зоне (после хода ~4,25м), поглотитель, продолжая движение, перемещается относительно неподвижного вытеснителя до тех пор, пока не займет крайнее нижнее положение (при этом ленточное звено поглотителя движется в кольцевом зазоре между каналом и вытеснителем диаметром 70 мм). Рабочий ход поглотителя стержня составляет 6650 мм.

Отличительной особенностью стержня является наличие семиметрового вытеснителя, что уменьшает количество воды в активной зоне при извлеченном поглотителе до 8 л. и соответственно снижается положительный эффект реактивности при обезвоживании КО СУЗ до ~ 2...2,5 $\beta_{эфф}$.

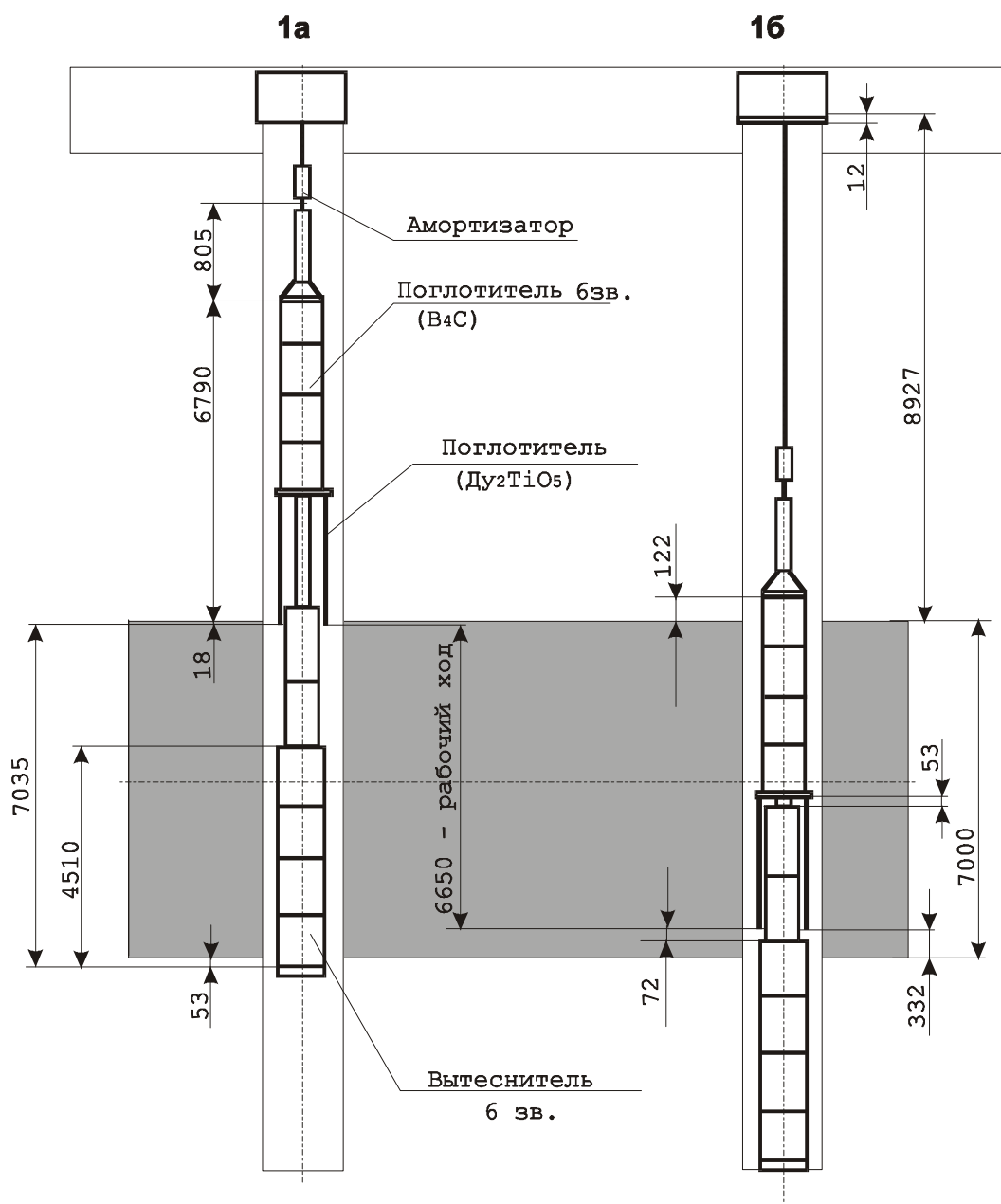


Рисунок 3- Исполнительный механизм PP

1а- стержень в крайнем верхнем положении

1б- стержень в крайнем нижнем положении

1.6.4 Стержень УСП изд. 2093.00.000 предназначен для работы в составе ИМ УСП и вводится в активную зону снизу-вверх для выравнивания высотного энергораспределения (рисунок 4).

Стержень УСП состоит из поглотителя и вытеснителя, соединенных жесткой штангой. Поглотитель включает 4 звена с поглотителем карбид бора общей длиной 4088 мм, а вытеснитель состоит из шести звеньев общей длиной 6700 мм. Конструкция звеньев поглотителя и вытеснителя аналогична конструкции звеньев поглотителя и вытеснителя стержня типа 2091.00.000-01. Верхняя часть вытеснителя заканчивается несущим звеном, посредством которого осуществляется соединение стержня с лентой СП.

При расположении стержня в крайнем нижнем положении поглотитель введен на 500 мм выше нижнего среза активной зоны, а вытеснитель полностью находится в зоне.

При перемещении стержня вверх вытеснитель частично извлекается из активной зоны, а поглотитель вводится в зону, при этом рабочий ход стержня составляет 3,5 м.

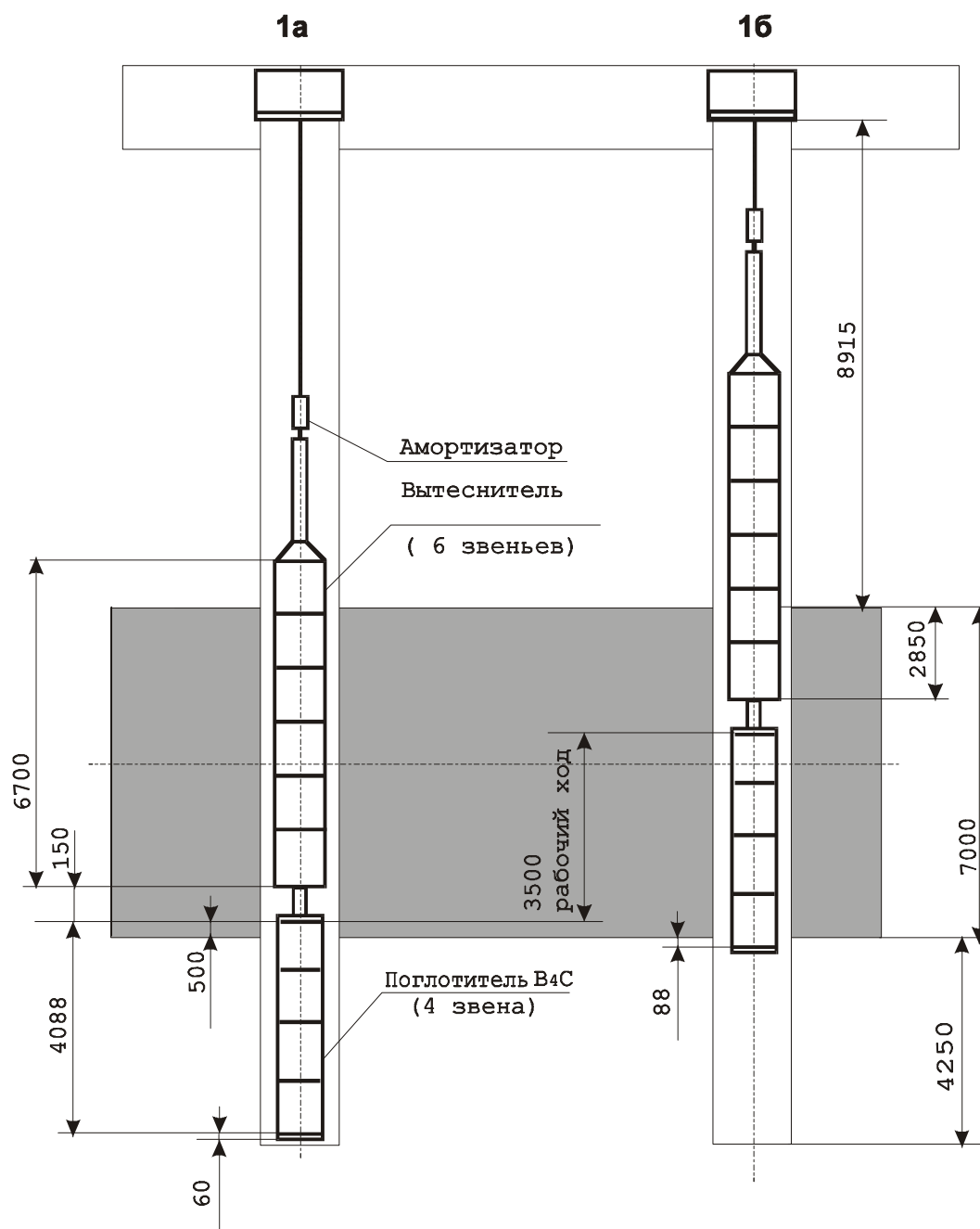


Рисунок 4-Исполнительный механизм УСП

1а - стержень в крайнем нижнем положении

1б - стержень в крайнем верхнем положении

Стержень ИМ БАЗ изд. 2505.00.000 (рисунок 5) состоит из 7-ми шарнирно-соединенных поглощающих звеньев с карбидом бора и общей длиной по поглощающей части 7,25 м (аналогичных звеньям поглотителя стержней СУЗ).

В качестве основного конструкционного материала используется алюминиевый сплав САВ1.

Отличие стержня БАЗ от остальных стержней с механическими вытеснителями состоит в следующем:

- эксплуатация стержня осуществляется в канале СУЗ с пленочным охлаждением канала на участке активной зоны (под стержнем). Формирование пленочного режима охлаждения обеспечивается пленкообразователем, установленным на нижнем конце стержня
- отсутствует механический подвижный вытеснитель. Он заменен на газовую полость, ограниченную пленкой воды толщиной 1...2мм.
- ввод стержня БАЗ в зону, за счет организации пленочного течения, осуществляется в канале с газовой полостью, а не в канале, полностью заполненном водой
- шарнирные соединения звеньев поглотителя выполнены перевернутыми, что обеспечивает поступление части охлаждающей воды во внутреннюю полость стержня.

Охлаждение стержня БАЗ осуществляется водой, заполняющей кольцевой зазор между стержнем и каналом по всей высоте стержня.

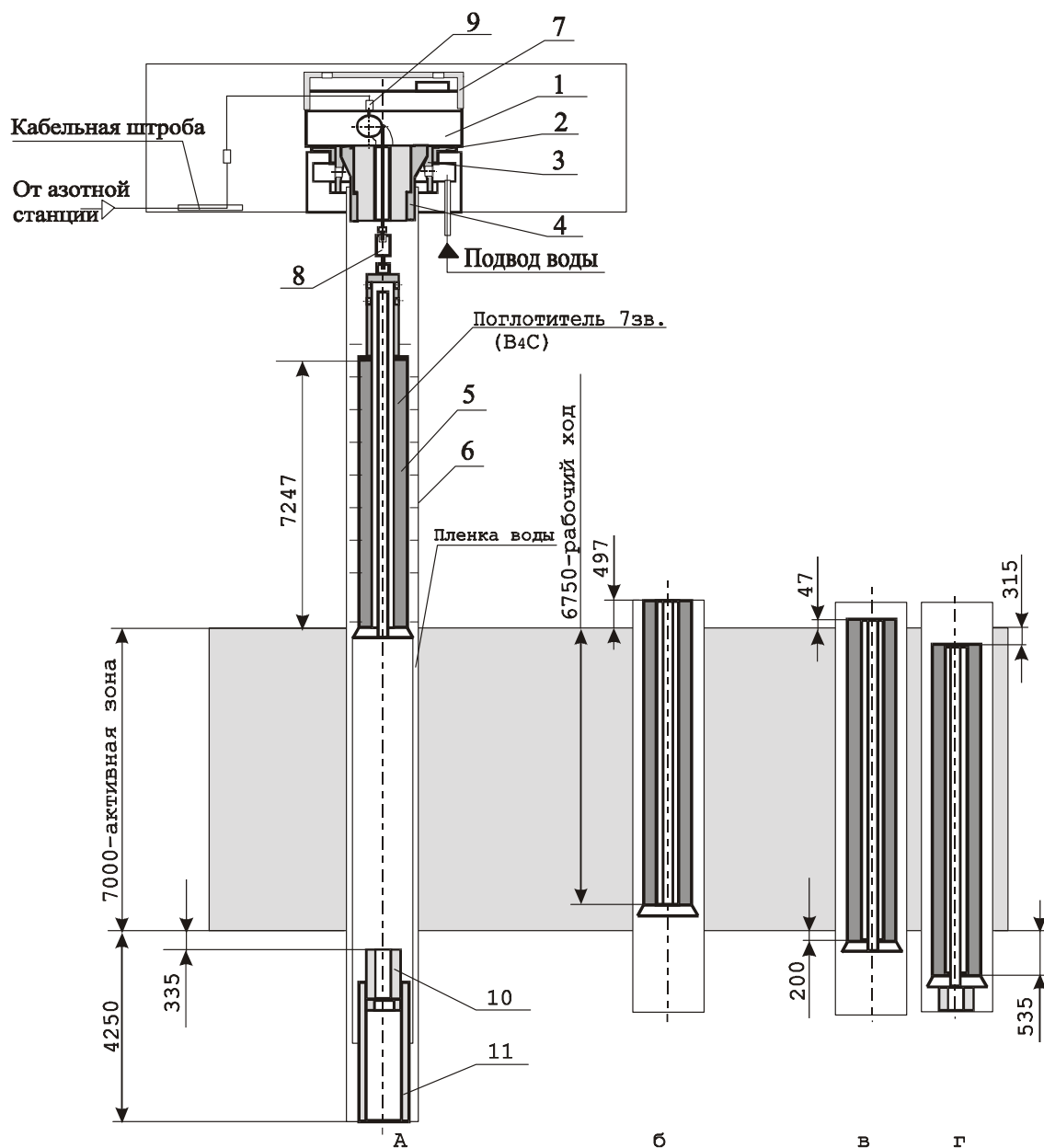
Часть воды поступает во внутреннюю полость стержня через полости перевернутых шарнирных соединений звеньев стержня. Выход воды из внутренней полости стержня осуществляется через шарнирное соединение нижнего звена стержня и пленкообразователя.

Внутри стержня БАЗ расположена газовая трубка, проходящая на всю длину стержня. Газовая трубка соединяет подстержневую газовую полость с надстержневой газовой полостью. Далее, газожидкостный клапан, установленный в СП, соединяет газовые полости с азотно-газовым контуром.

Газовый тракт обеспечивает:

- свободное сообщение газовых полостей в канале СУЗ под стержнем и над стержнем при перемещении стержня. Это исключает тормозящее воздействие газовой среды на стержень, перемещающийся с большой скоростью в аварийном режиме
- стабильность уровня нижнего столба воды (под активной зоной) за счет постоянства давления в подстержневой газовой полости. Величина этого давления определяется небольшим давлением в азотно-газовом контуре, небольшим разряжением в канале за счет эжекции газа пленкой воды и близка к атмосферному давлению.

При нормальной эксплуатации реактора стержни БАЗ выведены из зоны и находятся в крайнем верхнем положении.



а – стержень БАЗ на ВК; б – стержень БАЗ на НК; в – положение стержня БАЗ при максимальном выбеге относительно НК; г – положение стержня при обрыве ленты привода

1 – привод; 2 – фланец; 3 – втулка; 4 – вставка; 5 – стержень БАЗ; 6 – канал СУЗ; 7 – крышка –стульчик; 8 – подвеска; 9 – газожидкостный клапан; 10 – демпфер; 11 – опора.

Рисунок 5 – Исполнительный механизм БАЗ

1.7 Технические данные

1.7.1 Основные параметры и характеристики ИМ

Основные параметры и характеристики ИМ СКУЗ представлены в таблице 1.

Таблица 1

N п/п	Параметр	ИМ РР со стержнем 2477.00.000-01	ИМ АР со стержнем 2091.00.000-01	ИМ УСП со стержнем 2093.00.000	ИМ АЗ со стержнем 2505.00.000
1	2	3	4	5	6
1	Поглотитель:				
	длина поглощающей части, мм	6790	6772	4088	7247
	кол-во звеньев, шт.	5	7	4	7
2	Вытеснитель:				
	длина, мм	7100	4560	6700	>7000
	кол-во звеньев, шт	6	4	6	--
	тип	Подвижный механический, телескопически связанный с поглотителем		Подвижный механический жестко связанный с поглотителем	Газовый
3	Весовые параметры стержня, кгс:				
	на воздухе	63,0 \pm 1,8	52 \pm 1,8	53,0 \pm 1,8	43,0 \pm 1,5
	в воде	22,5	16,8 \pm 1,8	15,0 \pm 1,8	--
4	Рабочий ход, мм	6650 \pm 50	6550 \pm 50	3500 \pm 50	6750 \pm 450
5	Показания УП при положении стержня на, м:				
	ВК	0	0,2	4	0
	НК	6,65	6,55	0,5	6,75
6	Кинематические параметры:				
	скорость перемещения в режиме регулирования, м\с	0,4 \pm 0,1	0,2 \pm 0,05	0,4 \pm 0,1	(0,4 \pm 0,1) м/с – при вводе в зону
	время ввода в а.з. в аварийном режиме, с	14 $^{+3}_{-2}$		7...12	не более 2,5
7	Момент включения ЭДТ по УП в аварийных режимах, м	3 \pm 0,1	3,2 \pm 0,1	--	5,5...6

Параметры охлаждающей воды после установки ИМ в каналы СУЗ:

Температура на входе -

(40...55) °C

Температура на выходе -

не более 90 °C

Расход -

(3,6...4,5)м³/ч

Давление -

0,25 МПа

Параметры охлаждающей воды и вентилирующего газа после установки ИМ АЗ в канал

Наименование параметра	Охлаждающая вода	Вентилирующий газ (азот)
Расход, м ³ /ч	3,6 - 4,5	0,12 - 0,7
Температура на входе, °С	40 - 55	60 - 80
Температура на выходе, °С	80 - 90	80 - 90
Давление, кПа	близко к атмосферному (небольшое разрежение до 15; до 40 – при перекрытии подачи азота в канал)	близко к атмосферному (небольшое разрежение до 15; до 40 – при перекрытии подачи азота в канал)