

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОБООТБОРНИКА РУ БРЕСТ-ОД-300

Ярмоленко О.А., Моркин М.С., Лемехов В.В., Дерябин А.Ю., Лавренев Р.Н.,
Михайлов А.В., Колмогорцев А.В. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

Пробоотборник входит в состав системы отбора и анализа проб свинцового теплоносителя (СТ), являющейся частью системы контроля герметичности оболочек твэлов (КГО) РУ БРЕСТ-ОД-300 [1]. Пробоотборник предназначен для отбора проб СТ из блока реакторного в целях обеспечения периодического контроля содержания в теплоносителе:

- йода и цезия для анализа герметичности оболочек твэлов по их активности в СТ;
- железа, хрома и никеля для анализа коррозионных процессов в контуре (дополнительно к функциям системы контроля и поддержания качества теплоносителя (СКПКТ)).

Информация об активности продуктов деления в теплоносителе формируется по результатам расшифровки гамма-спектров пробы (после специальной химической подготовки), в ходе которой из спектра выделяются линии изотопов йода и ^{137}Cs . Активность этих радионуклидов является одним из важнейших диагностических признаков разгерметизации твэлов в активной зоне.

Помимо задач КГО анализ проб позволяет отслеживать изменение содержания продуктов коррозии оборудования первого контура в свинце с целью получения дополнительной информации о качестве теплоносителя и состоянии конструкционных материалов контура циркуляции. Изменение в процессе эксплуатации массовых концентраций железа, хрома и никеля в СТ является одним из диагностических признаков нарастания или стабилизации коррозионных процессов в первом контуре или истощения емкости фильтров теплоносителя. Результаты анализа отобранной пробы свинца на содержание этих примесей, рассматриваемые совместно с показаниями СКПКТ и другими эксплуатационными данными, позволяют принимать необходимые меры для обеспечения требуемого качества теплоносителя.

1. Выбор варианта исполнения

Особенностью РУ БРЕСТ-ОД-300 с точки зрения организации отбора проб теплоносителя является интегральная компоновка первого контура. Принятая концепция безопасности корпуса блока реакторного (БР) предусматривает локализацию аварийных протечек теплоносителя в пределах самого корпуса, что делает невозможным врезку пробоотборных каналов ниже уровня теплоносителя. Другая важная особенность пробоотбора – требование исключить смешивание пробы, отбираемой из-под свободного уровня расплава, с поверхностными слоями теплоносителя, которые могут содержать шлаки.

В литературе описаны следующие варианты устройств для отбора проб жидкометаллического теплоносителя, которые могут быть использованы для ядерного реактора баковой компоновки:

- устройство с вертикально перемещаемой вакуумируемой трубой и уплотнителем снизу [2] (рис. 1);
- устройство со штоком, вертикально перемещающим кассету со стаканчиками для проб (пробоотборник натрия первого контура реактора БН-600) [3] (рис. 2);
- устройство для вакуумного отбора пробы через боковой наклонный канал [4] (рис. 3).

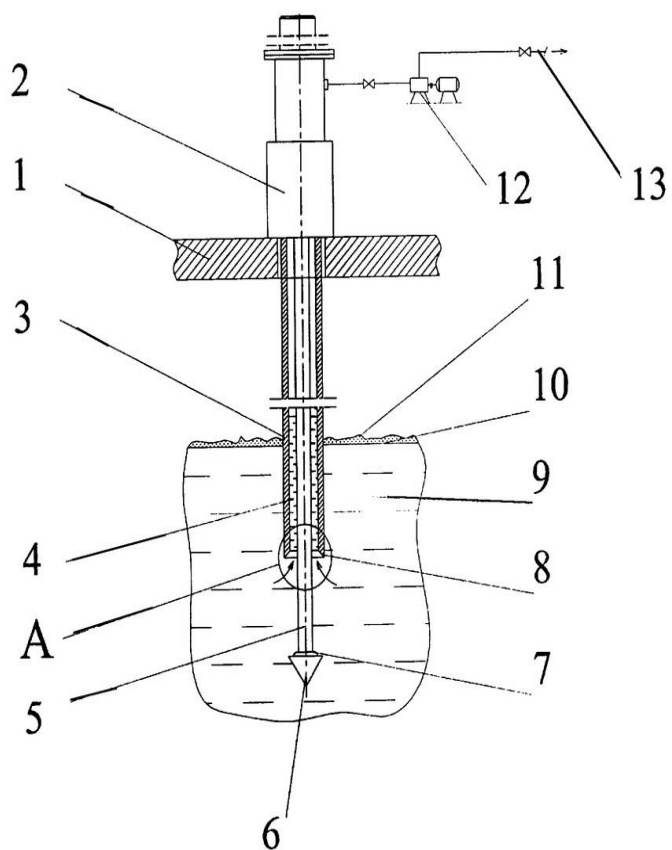


Рис. 1. Вариант с перемещаемой трубой

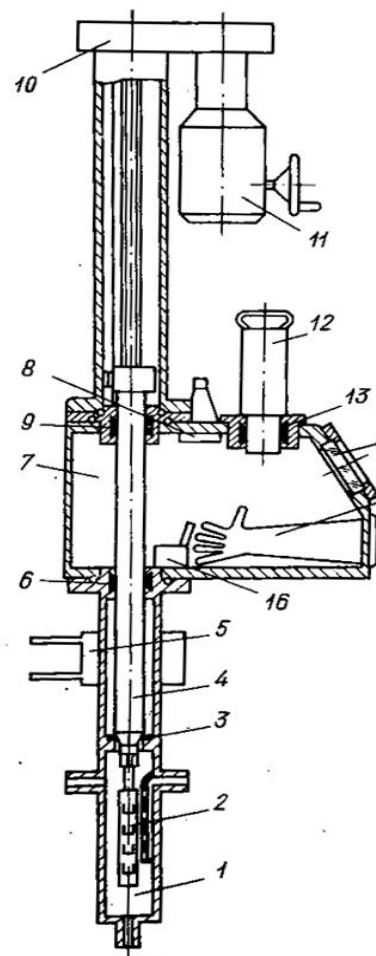


Рис. 2. Вариант с перемещаемыми стаканчиками

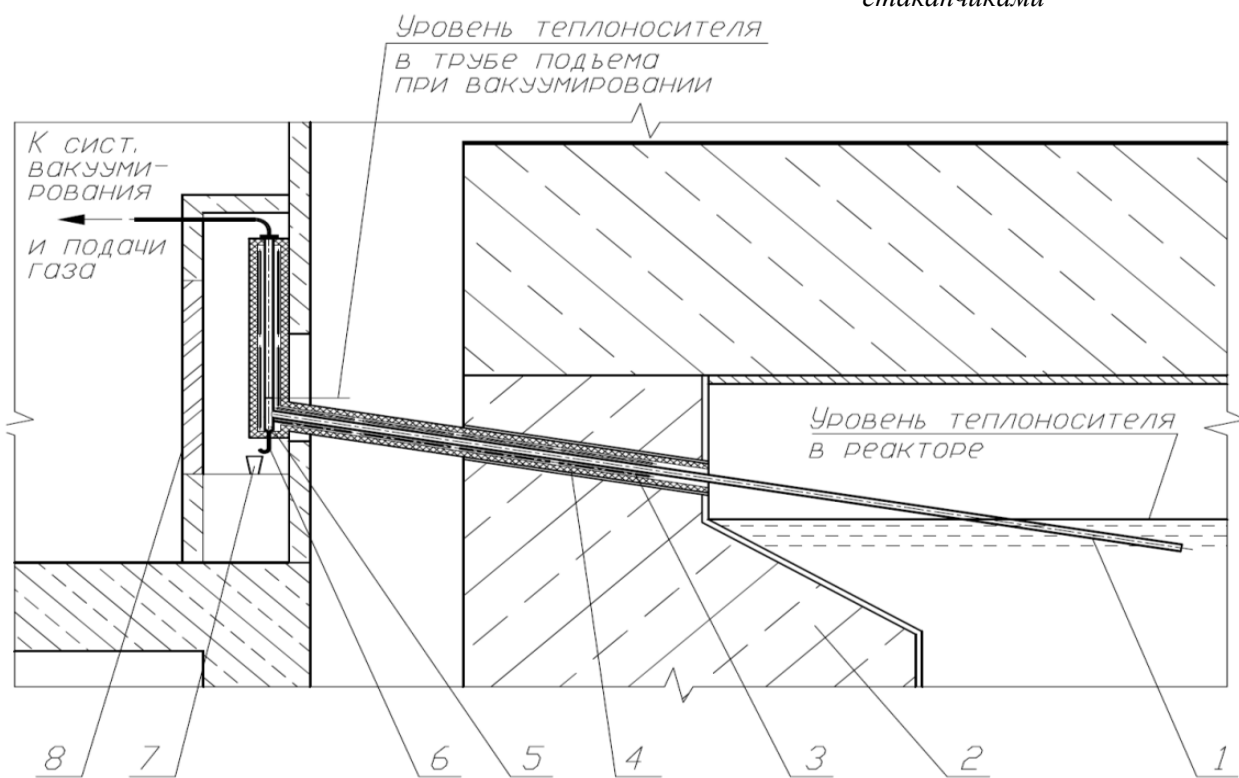


Рис. 3. Вариант с наклонным вакуумируемым каналом

Для двух первых вариантов устройств, в случае их применения на РУ БРЕСТ-ОД-300, потребуются механизмы вертикального перемещения с большим ходом штока ($\approx 5...6$ м), причем механизмы должны помещаться в герметичном контейнере, к которому должны подводиться коммуникации: электрические, вакуумные и газовые трассы. Размещение оборудования пробоотборника на верхнем перекрытии БР РУ БРЕСТ-ОД-300 затруднено ввиду его затесненности, неудобства обслуживания и обращения с пробой.

Недостатком третьего варианта устройства с вакуумным отбором пробы через боковой наклонный канал является то, что возможность пробоотбора есть только на номинальном уровне мощности РУ, поскольку максимально возможная высота отбора пробы (над уровнем свинца – определяемая вакуумным подъемом свинца) при таком способе отбора не превышает 1 м.

Учитывая изложенное, для последующей разработки в техническом предложении по пробоотборнику [5] был выбран вариант наклонного канала с механическим способом извлечения пробы из объема теплоносителя в корпусе БР.

2. Конструкция и технические характеристики пробоотборника

Пробоотборник в целом является комплексом, состоящим из соединяемых при монтаже на АЭС следующих составных частей:

- механический комплекс пробоотборника (МКП), размещаемый частично в корпусе БР, частично – в защитном боксе помещения пробоотборника и в помещении кольцевого зазора вокруг БР;
- аппаратура контроля и управления (программно-технический комплекс пробоотборника (ПТК)), которая осуществляет управление пробоотборником.

В состав МКП входят следующие основные элементы:

- 1) электронагреватель (ЭН);
- 2) трубка транспортировки капилляра (ТТК);
- 3) газовый затвор, включающий:
 - а) тройник для подачи чистого аргона;
 - б) шибер;
 - в) устройство уплотнения капилляра;
- 4) капилляр пробоотборный (с капсулой отбора пробы);
- 5) механизм транспортировки капилляра (МТК), включающий:
 - а) катушку для намотки капилляра;
 - б) устройство подачи капилляра;
 - в) раму механизма;

Конструктивная схема МКП в момент отбора пробы, необходимая для понимания функционирования пробоотборника, приведена на рис. 4.

Пробоотборник устанавливается в реакторном здании, где для него предусмотрено специальное помещение. Для установки и обеспечения работы пробоотборника в корпусе БР (выше уровня СТ) предусмотрен прямой канал (с уклоном в сторону периферийной полости корпуса) с изогнутым ложементом (конец которого заглублен под уровень СТ), а в стене помещения пробоотборника – отверстие, соосное каналу. Через канал проходит трубка транспортировки капилляра (по которой транспортируется капилляр пробоотборный с капсулой отбора пробы). ТТК устанавливается внутри электронагревателя, который используется в случае засорения ТТК каплями свинца для облегчения транспортировки пробы, а также при необходимости прочистки ТТК. Нижний конец ТТК постоянно погружен под уровень теплоносителя. Механизм транспортировки капилляра (МТК) содержит катушку с намотанным на нее капилляром пробоотборным и устройство подачи капилляра. МТК установлен на специальной раме.

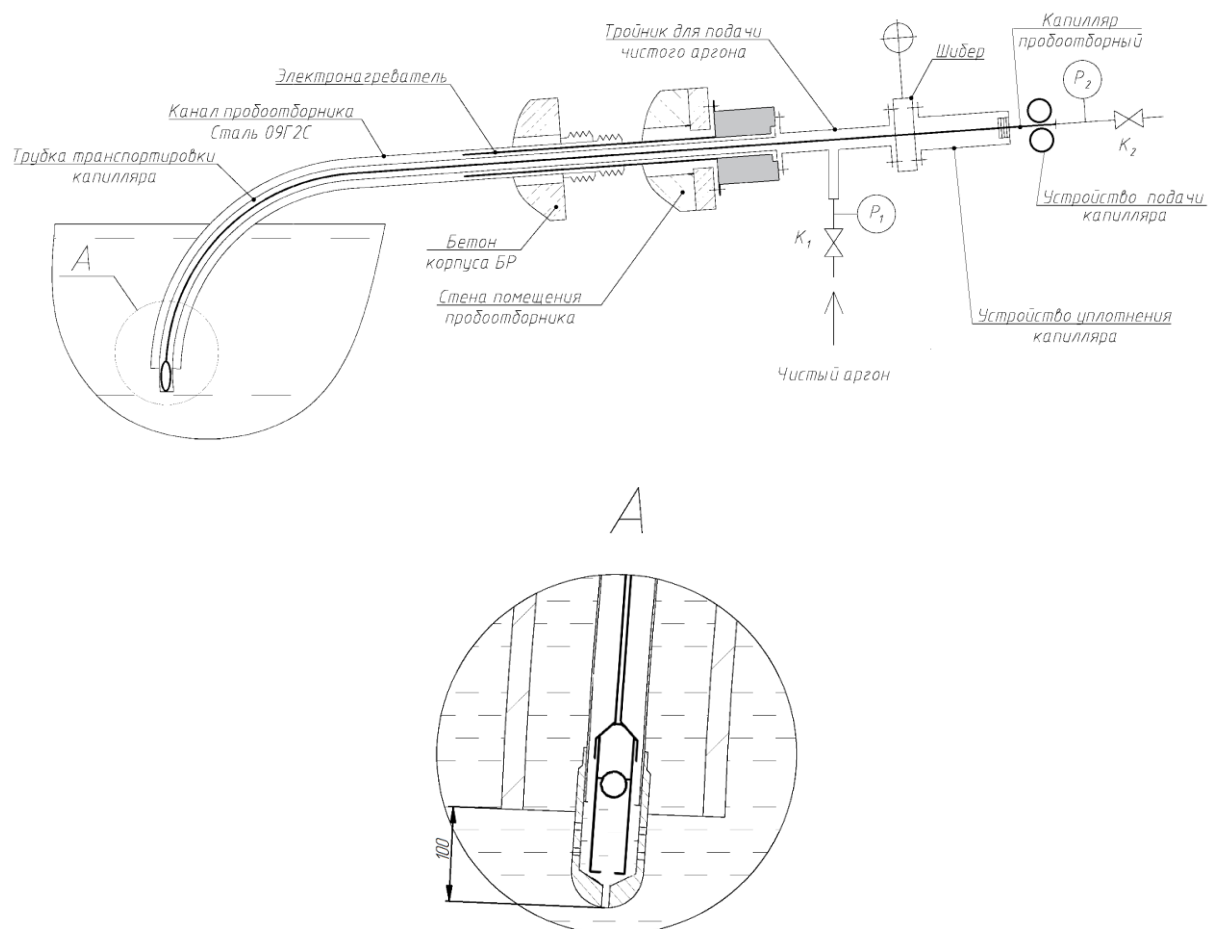


Рис. 4. Схема состояния пробоотборника в момент отбора пробы (капсула капилляра пробоотборного в нижнем положении)

Заглубление точки отбора пробы под свободный уровень теплоносителя как при работе РУ на различных уровнях мощности, так и на остановленной РУ, прежде всего обеспечивает возможность отбора пробы в любой период эксплуатации РУ, кроме того отделение внутренней полости трубки от газовой полости реактора практически исключает выход радионуклидов из газовой полости за пределы корпуса БР. Точка отбора находится в одной из четырех периферийных полостей РУ вблизи выхода одного из ГЦНА, где высокая интенсивность течения, поэтому теплоноситель здесь постоянно обновляется и хорошо перемешан, что обеспечивает представительность результатов анализа пробы. Минимальное заглубление точки отбора под уровень теплоносителя (при остановленной РУ) составляет ≈ 100 мм, что обеспечивает несмешивание отбираемой пробы с поверхностными слоями, которые могут содержать шлаки.

Отбор пробы осуществляется следующим образом. В исходном положении капсула капилляра находится в верхнем положении (т. е. в устройстве уплотнения капилляра). Шибер и клапаны на входе в ТТК и капилляр пробоотборный (К1 и К2 по рис. 4) закрыты. Открытием клапана К1 осуществляется продувка ТТК, что обеспечивает уровень СТ в ТТК на уровне среза канала пробоотборного. Далее шибер открывается и после повторной продувки ТТК, обеспечивающей выравнивание давлений в ТТК и капилляре (на уровне примерно 1 атм изб. – при заглублении нижнего среза канала относительно уровня СТ в периферийной полости РУ на 1 м), осуществляется загрузка капилляра пробоотборного в ТТК. После достижения капсулой капилляра нижнего положения (см. вид А на рис. 4) плавным открытием клапана К1 внутри капилляра осуществляется сброс давления до разряжения относительно наружного давления СТ, обеспечивающего удержание отобранной пробы в капсуле при ее извлечении из ТТК.

После извлечения капилляра с капсулой в верхнее положение шиббер закрывается устройство уплотнения капилляра раскрывается, застывшая отобранная проба СТ извлекается из капсулы и передается в радиохимическую лабораторию энергоблока для выполнения требуемых анализов.

Основные технические характеристики пробоотборника в соответствии с техническим проектом [6]:

– масса пробы, г	24±4
– рабочий ход транспортировки пробы, мм	8300
– минимальное время транспортировки пробы, с	100
– мощность, потребляемая электронагревателем, Вт	900
– электропитание нагревателя (переменный ток), В	(40–220)
– максимальный перепад давления на капсуле, кПа	40
– расход чистого аргона на отбор пробы, не менее, л	1,5
– периодичность отбора проб:	
○ для контроля продуктов деления	1 раз в неделю
○ для контроля продуктов коррозии	1 раз в год
○ внеплановые отборы проб	по требованию
– срок службы, лет	30

Выполненные тепловые расчеты подтверждают допустимый уровень температур на основных элементах конструкции в процессе отбора проб. При работающем ЭН температура основных элементов не превышает следующих допустимых и требуемых значений:

– для ТТК (на всей длине участка от наконечника ТТК до фланца ЭН)	не менее 360 °С;
– для бетона корпуса БР, окружающего канал пробоотборника	не более 500 °С;
– для жил нагревательных кабелей	не более 800 °С.

Расчеты на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия подтверждают работоспособность предложенной в ТП пробоотборника конструкции.

Расчетные оценки, выполненные с учетом экспериментально фиксируемого частичного осаждения цезия на стенках контура, показывают, что его активность в свинце контролируется в диапазоне от приблизительно 0,3 эксплуатационного предела по разгерметизации твэлов до значений, значительно превышающих предел безопасной эксплуатации (ПБЭ). Активность йода-131 контролируется в диапазоне от фоновое значения, до значения, превышающего ПБЭ.

Расчеты мощностей дозы от отобранных проб показывают, что разработанная конструкция, представленная в ТП, предусматривает заметное снижение дозовых нагрузок на персонал при отборе пробы (по сравнению с вариантами, рассматриваемыми на стадии технического предложения), позволяя одному оператору в течение года реализовывать процесс обращения с пробой как в плановом режиме (1 раз в неделю), так и в ускоренном на начальном периоде эксплуатации (1 раз в сутки).

Пробоотборник РУ БРЕСТ-ОД-300 с боковым наклонным расположением пробоотборного канала вместо вертикального, предусматривающего необходимость остановки РУ для выполнения отбора пробы, является инновационной разработкой, не имеющей аналогов среди соответствующих устройств, в том числе, для быстрых реакторов. Конструкция защищена двумя патентами на изобретения, созданными в процессе разработки [7, 8].

Экономическая эффективность предложенной конструкции, оцененная за счет сокращения времени простоя РУ БРЕСТ-ОД-300, составит около 8,9 млрд руб. за 30 лет эксплуатации РУ.

Работоспособность конструкции подтверждается также нижеописанными результатами экспериментальных исследований, включающими в том числе испытания по отбору проб расплавленного СТ.

3. Испытания по отработке режима загрузки-выгрузки ТТК и капилляра пробоотборного

Целью испытаний являлось экспериментальное подтверждение возможности безаварийной загрузки-выгрузки ТТК и капилляра пробоотборного с капсулой в канал/ из канала БР РУБРЕСТ-ОД-300 с изогнутым ложементом, а также получение экспериментальных данных по поведению отдельных элементов пробоотборника в процессе испытаний.

Испытания были проведены в июне 2018 г. в большом стендовом зале АО «НИКИЭТ» на полномасштабной экспериментальной установке (рис. 5), имитирующей область размещения ТТК на РУ, а именно: внутреннюю трубу ЭН, канал корпуса БР и ложемент, в которых трубка ТТК занимает свое проектное (наклонное изогнутое) положение.

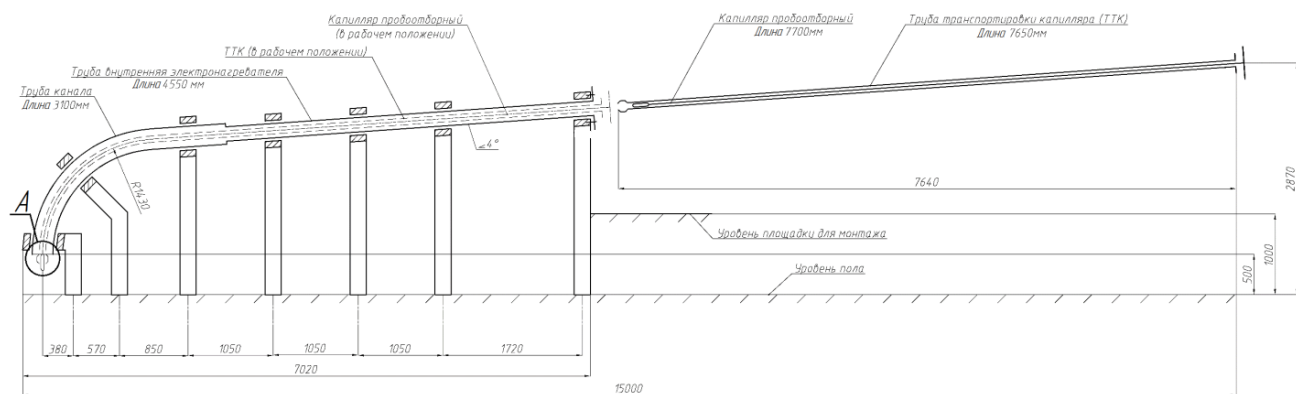
Было испытано два варианта трубок ТТК: проектный (с наружным диаметром 16 мм и толщиной стенки 0,5 мм) и более жесткий (с тем же наружным диаметром 16 мм, но с большей толщиной стенки – 1 мм) и два варианта капилляров пробоотборных: с проектной капсулой под уплотняющий шарик и с вариантом капсулы под уплотняющее щелевое устройство.

Проведенные испытания подтвердили возможность загрузки-выгрузки проектного варианта трубки транспортировки капилляра в полномасштабный имитатор канала пробоотборника с изогнутым ложементом. Проведено по два цикла загрузки-выгрузки для двух макетов ТТК $\Phi 16 \times 0,5$ мм длиной 7650 мм с сохранением их герметичности и внутренней проходимости (проверка калибром $\Phi 14,5$ мм по всей длине ТТК). Максимальные усилия загрузки – выгрузки проектного варианта ТТК находились на уровне ручного осуществления этих операций без использования дополнительных механизмов. Осмотр макетов после извлечения показал отсутствие явных задилов, царапин, заломов и складок на поверхности. Максимальное изгибное отклонение (после извлечения) от прямой, соединяющей начала и концы макетов, было зафиксировано на расстоянии 1500 мм от наконечника и составило примерно 225 мм для каждого из испытанных макетов $16 \times 0,5$ мм (рис. 6, а).

Вариант ТТК, выполненной из трубы с наружным диаметром 16 мм и толщиной стенки 1 мм, как и ожидалось, оказался более жестким, чем основной вариант (труба $16 \times 0,5$ мм): загрузку его в канал удалось осуществить усилием на уровне 114 кг на глубину 7 м, дозагрузка осуществлялась посредством последовательных ударов гирей массой 2 кг через деревянный брусок. Тем не менее загруженная ТТК сохранила герметичность с обеспечением проходимости калибра диаметром 12,5 мм.

Испытания подтвердили возможность многократной загрузки-выгрузки капилляров пробоотборных в ТТК (расположенную в изогнутой части имитатора канала пробоотборного): в два проектных макета ТТК (труба $16 \times 0,5$ мм с внутренним диаметром 15 мм) осуществлено 82 цикла загрузки-выгрузки капилляров пробоотборных, в более жесткий вариант ТТК с меньшим внутренним диаметром, чем в проектном (труба 16×1 мм с внутренним диаметром 14 мм) осуществлено 54 цикла загрузки-выгрузки.

Полученные данные свидетельствуют о ремонтопригодности, возможности замены отдельных элементов, работающих в жестких условиях высокотемпературного СТ, представляют необходимую информацию для уточнения процессов обращения с изделием.



Вид А
Положение капсулы и ТТК после загрузки на выходе из канала

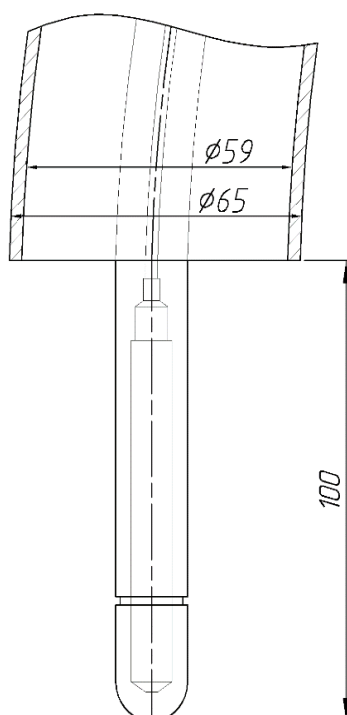


Рис. 5. Схема ЭУ для испытаний по загрузке-выгрузке ТТК и капилляра пробоотборного в канал БР РУ БРЕСТ-ОД-300



а)



б)

Рис. 6. ТТК после извлечения из канала:
а) ТТК $\phi 16 \times 0,5$ мм; б) ТТК $\phi 16 \times 1$ мм

4. Испытания по отработке режима заполнения и удержания пробы свинцового теплоносителя в капсуле пробоотборника

Целью испытаний являлось экспериментальная отработка режимов заполнения и удержания пробы СТ в капсуле пробоотборника, а также получение экспериментальных данных, необходимых для выбора и обоснования работоспособного варианта конструкции капсулы.

Испытания были организованы и проведены в малом стендовом зале АО «НИКИЭТ» в два этапа: на первом в двух сериях экспериментов 2018 года была показана принципиальная возможность отбора проб в предложенных конструктивных решениях по пробоотборнику и капсуле, на завершающем этапе 2019 года в условиях, максимально приближенных к натурным условиям отбора проб в реальном канале РУ БРЕСТ-ОД-300, была продемонстрирована стабильность отбора для выявленного в процессе испытаний оптимального варианта конструктивного оформления капсулы.

Экспериментальная установка (ЭУ) (рис. 7) на первом этапе испытаний включала в себя следующие основные системы и элементы:

- 1) испытательный бак (поворотной конструкции, допускающий отклонение от вертикали);
- 2) капилляр пробоотборный с капсулой;
- 4) система вакуумирования и продувки капилляра;
- 5) газовая системы ЭУ пробоотборника;
- 6) система контроля и поддержания качества теплоносителя;
- 7) система подготовки и хранения СТ;
- 8) система электропитания;
- 9) информационно – измерительная система.

Основные параметры испытаний

Температура СТ и газа в испытательном баке, °С	420±5
Давление аргона (номинальное) в испытательном баке, МПа (абс.)	0,105±0,01
Давление аргона в промежуточной емкости (определяется требуемым перепадом при отборе пробы), МПа (абс.)	от 0,105 до 0,005
Массовая доля растворенного в СТ кислорода, %	(1–4)·10–6

На первом этапе работы было испытано два основных конструктивных варианта капсулы: с удерживающим уплотнением типа шар по конусу (рис. 8) и с щелевым уплотнением (рис. 9) – в расчете на запирающее усилие, создаваемое в щелях поверхностными силами. При испытаниях варьировались также:

- удерживающий пробу при извлечении перепад давления на капсуле;
- диаметр входного отверстия в капсуле;
- угол конусности посадочной поверхности под шарик в капсуле;
- конусность полости капсулы (для оценки ее влияния на извлекаемость застывшей пробы из капсулы).

Программой испытаний предусматривалось проведение экспериментов с отбором проб в вертикальном, наклонном (при поворотах отклонения поворотного бака от вертикали на 30, 45 и 60°) положениях, а также с имитацией искривленности канала при отборе (отбор проб в вертикальном положении, поворот бака на 86° от вертикали и последующее извлечение капилляра с пробой в практически горизонтальном положении). Параметры испытаний и геометрические размеры испытываемых объектов определялись на основе предварительных расчетных оценок удержания пробы с учетом весовых нагрузок, сил сцепления СТ и удерживающих пробу перепадов давления.

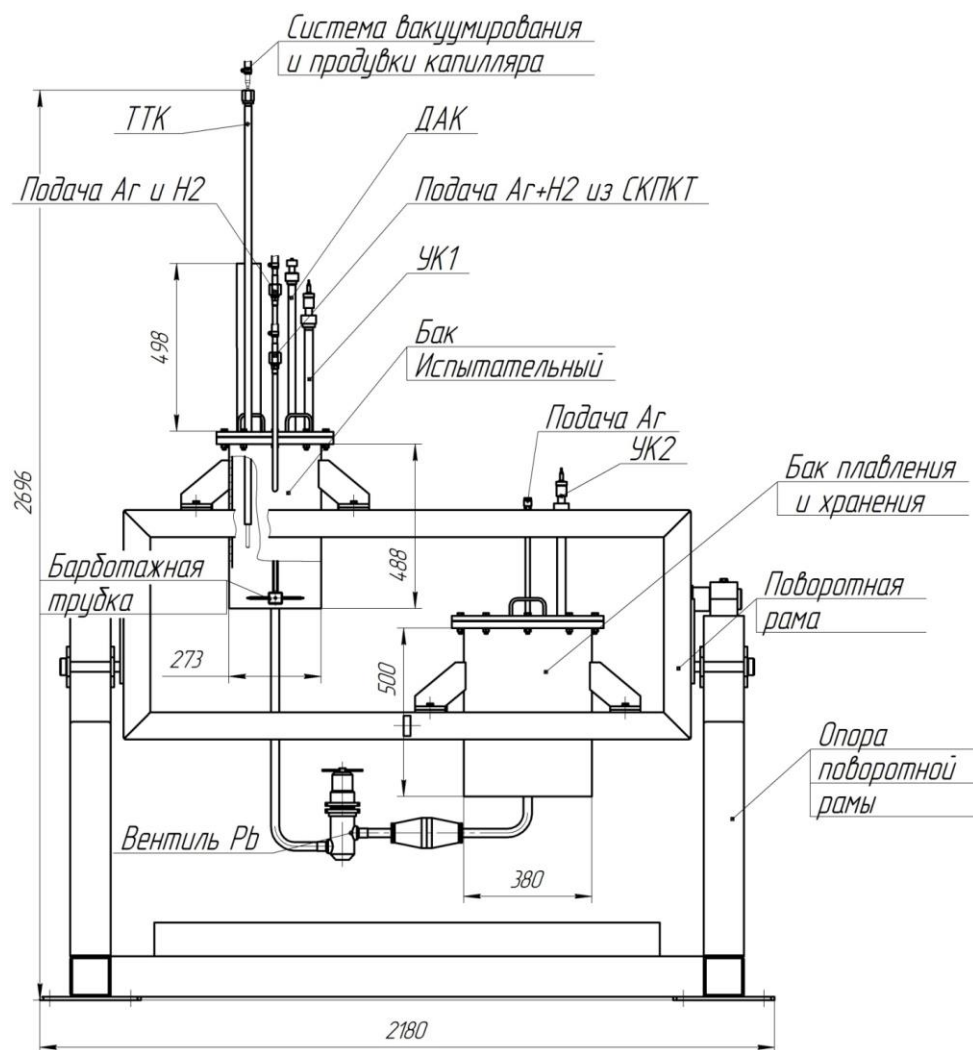


Рис. 7. Схема ЭУ для испытаний капсулы пробоотборника:
 ДАК – датчик активности кислорода, УК – подвижный контактный уровнемер,
 ТТК– трубка транспортировки капилляра

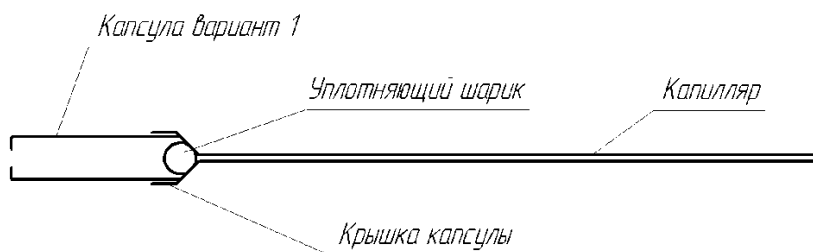


Рис. 8. Капилляр с капсулой с перекрытием отверстия в крышке капсулы
 при помощи уплотняющего шарика

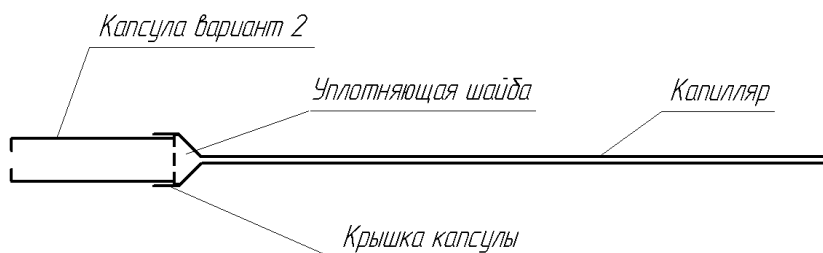


Рис. 9. Капилляр с капсулой с перекрытием отверстия в крышке капсулы при помощи уплотняющей шайбы с целевыми отверстиями

Отбор проб при испытаниях (после выполнения подготовительных мероприятий по вакуумированию, электроразогреву, заполнению емкостей аргоном и свинцом) осуществлялся следующим образом. Капилляр с капсулой опускался в «горячую» зону ТТК для прогрева до 420°С. В испытательном баке и капилляре устанавливалось избыточное давление 5 кПа. Промежуточная емкость вакуумировалась до установления давления, обеспечивающего (при открытии вентиля между ней и капилляром) требуемый (в соответствии с режимом испытаний) перепад давления на капсуле. Капилляр с капсулой опускался на глубину до уровня соприкосновения со СТ. Испытательный бак и капилляр при помощи вентиля разъединялись по газу. Открывался вентиль между промежуточной емкостью и капилляром и соответственно устанавливался требуемый перепад на капсуле, необходимый для отбора пробы СТ и ее удержания в капсуле при извлечении капилляра. Капилляр поднимался в «холодную» зону ТТК и после охлаждения до застывания пробы (контрольная температура 50°С) извлекался для осмотра.

В качестве критерия успешности проведения испытаний было принято достижение следующего результата: капсула после испытания и извлечения из ТТК заполнена СТ полностью от входного отверстия до герметизирующего элемента, СТ в капилляре отсутствует.

Первая серия испытаний 2018 г. (30 экспериментов с уплотняющим шариком и 36 с уплотняющей шайбой – все в вертикальном положении) позволила сузить диапазон последующих испытаний, во-первых, поскольку была показана стабильность отбора проб для варианта с уплотняющим шариком в суженном интервале и удерживающих перепадов давлений и диаметров входных отверстий, во-вторых, поскольку выявила нецелесообразность продолжения на настоящем этапе испытаний с уплотняющей шайбой (количество успешных опытов не превысило 25 %).

Проведенная серия выявила ряд эффектов, влияющих на ход экспериментов. Так, на рисунках 10 и 11 отражен один и тот же эксперимент с уплотняющим шариком с одним и тем же входным отверстием при одном и том же удерживающем перепаде, но с разными результатами: в эксперименте № 2 (см. рис. 10) капсула заполнена, а капилляр забит свинцом на глубину до 35 мм, в эксперименте № 21 (см. рис. 11) капсула заполнена, капилляр и резьба капсулы чисты.

Полученный результат выявил влияния скорости создания перепада давления на капсуле (путем сброса давления в капилляре) на отбор пробы. Из-за высокой жидкотекучести СТ резкий скачек перепада давления в эксперименте № 2 привел к опережению скорости подъема свинца над скоростью подъема шарика в капсуле, а в результате, к забросу свинца в капилляр. В эксперименте № 21, проведенном уже после замены на линии создания перепада шарового клапана на игольчатый регулировочный вентиль, время создания перепада (191 с) было заметно больше, чем в эксперименте № 2 (30 с) при плавном без скачков нарастании перепада.

Вторая серия испытаний 2018 года в целом подтвердила возможность отбора проб капсулой с шариком в режимах отбора в наклонных положениях с углами отклонения от вертикали 30, 45 и 60° (рис. 12), однако, по данным 48 исследованных режимов при

варьируемых диаметрах отверстия в капсуле и давлениях удержания шарика в капсуле доля успешных экспериментов снизилась с 89 % (в аналогичных опытах первой серии с вертикальным отбором проб) до 75 %.

При переходе во 2-й серии экспериментов 2018 года к более сложному алгоритму извлечения пробы – режиму извлечения пробы в практически горизонтальном положении (отбор пробы в вертикальном положении, поворот бака с отобранной пробой на угол 86° от вертикали, т.е. до практически горизонтального положения и последующее ее извлечение) доля успешных экспериментов на базе 18 проведенных опытов упала до ~ 39 %.

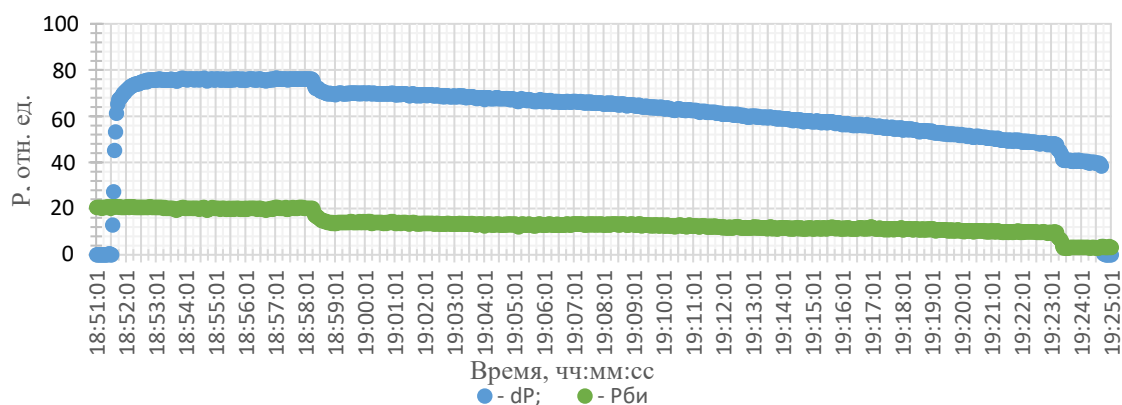


Рис. 10. Изменение перепада давления в капсуле с шариком и давления в испытательном баке во время эксперимента № 2:

РБИ – давление в испытательном баке Ризб, отн. ед.;

dP – перепад давления на пробоотборном капилляре, отн. ед

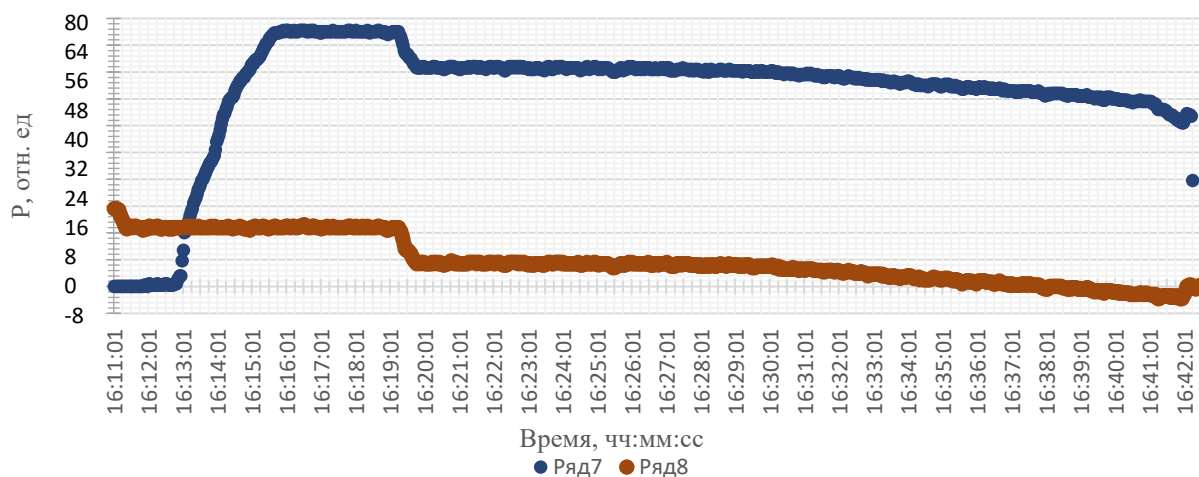


Рис. 11. Изменение перепада давления в капсуле с шариком и давления в испытательном баке во время эксперимента № 21 (повтор опыта № 2):

ряд 8 – давление в испытательном баке Ризб, отн. ед.; ряд 7 – перепад dP, отн. ед.

Предпринятые меры (раскрепление верха трубки транспортировки капилляра поворотного испытательного бака относительно поворотной рамы с целью исключения вибрации верхнего конца ТТК, уменьшение угла раскрытия крышки капилляра с целью повышения силы удержания шарика в крышке) положительно сказались на результатах последующих испытаний 2018 г.: доля успешных опытов по данным 12 исследованных режимов составила 75 %. Однако стабильности отбора проб при испытаниях с поворотом бака в наклонное практически горизонтальное положение достичь не удалось.



Рис. 12. Испытательный бак ЭУ под углом 30°

В 2019 году после реализации сформулированных рекомендаций (замена прямого участка имитатора трубки ТТК, расположенного в крышке бака испытательного, на изогнутый ТТК пробоотборного канала РУ БРЕСТ-ОД-300 – с целью исключения вибраций, обусловленных поворотом испытательного бака при переводе его из вертикального в наклонное практически горизонтальное положение; введение на линии создания перепада давления на капсуле при отборе пробы дополнительного вентиля точной регулировки – для исключения начальных бросков давления СТ в капсуле пробоотборника; конструктивная доработка капилляра в части обеспечения более высокой степени герметизации соединения «капсула–капилляр» с варьируемым углом раскрытия конуса в крышке капилляра) испытания были продолжены на доработанной ЭУ (рис. 13).

Предпринятые меры положительно сказались на получаемых результатах. В первой серии испытаний 2019 г. в натурном (изогнутом) исполнении ТТК было испытано три варианта конструкции капсулы (с разными диаметрами входных отверстий и двумя углами раскрытия конуса в крышке капилляра) при двух удерживающих давлениях. В результате наилучшие (безаварийные во всех испытанных режимах) результаты показали два варианта капсулы (с одним и тем же входным отверстием, при одном и том же удерживающем перепаде давления, но с разными углами раскрытия конуса).

На заключительном этапе оба этих варианта были испытаны на надежность отбора пробы на базе 25 циклов испытаний каждый. В результате был получен на 100 % положительный результат для каждого из вариантов (пробы отобраны на всей длине капсул, капилляры не забиты СТ).

С учетом более надежного удержания пробы в варианте капсулы с меньшим углом раскрытия конуса (среднее давление удержания шарика в крышке капилляра при испытаниях на воздухе в вертикальном положении для меньшего угла раскрытия конуса,

определенное на базе 100 циклов испытаний оказалось на порядок меньше, чем для большего), а также более высокой массы отбираемой пробы (на 11 % по результатам 25 циклов испытаний на надежность) для использования в техническом проекте пробоотборника по результатам испытаний был отобран оптимальный вариант капилляра с капсулой с меньшим углом раскрытия конуса. В ходе испытаний 2019 года для него выполнен 31 безаварийный отбор пробы.

Характерный вид графика изменения давлений в этом варианте капсулы приведен на рис. 14, фото отбираемой пробы – на рис. 15. Конструкция допускает многократное использование основных элементов: капилляра с крышкой и капсулы. В испытаниях 2019 года было использовано 18 капсул и 12 капилляров, максимальное число испытаний для отдельных капсул составило 13, для капилляров с крышкой – 11. Многократно осуществлялось отделение капсул с пробой от капилляра с крышкой. Проба извлекалась из капсул в основном с постукиванием (и лишь иногда свободно). На многих пробах присутствуют незначительные (иногда заметные) углубления, обусловленные в основном горизонтальным положением проб при извлечении и остывании. Их формирование объясняется как разностью коэффициентов температурного расширения свинца пробы и стали капсулы, так и некоторой степенью негерметичности разборного резьбового соединения капсулы.

В качестве рекомендаций по результатам испытаний здесь целесообразно отметить необходимость введения капилляра с пробоотборником в соприкосновение со свинцом на пониженной скорости с обеспечением последующего плавного создания удерживающего перепада давления на капсуле.

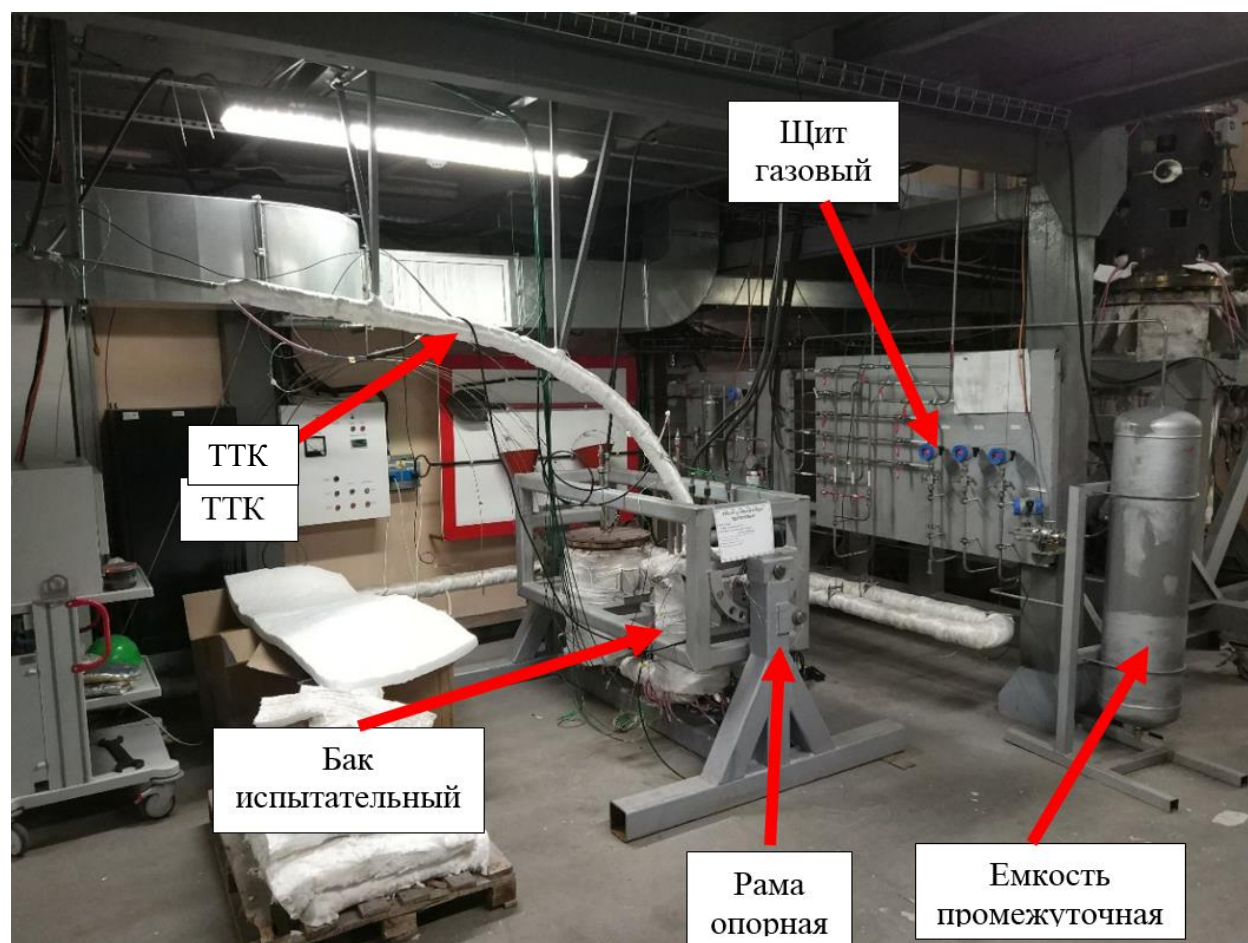


Рис. 13. Доработанная ЭУ для проведения испытаний пробоотборника

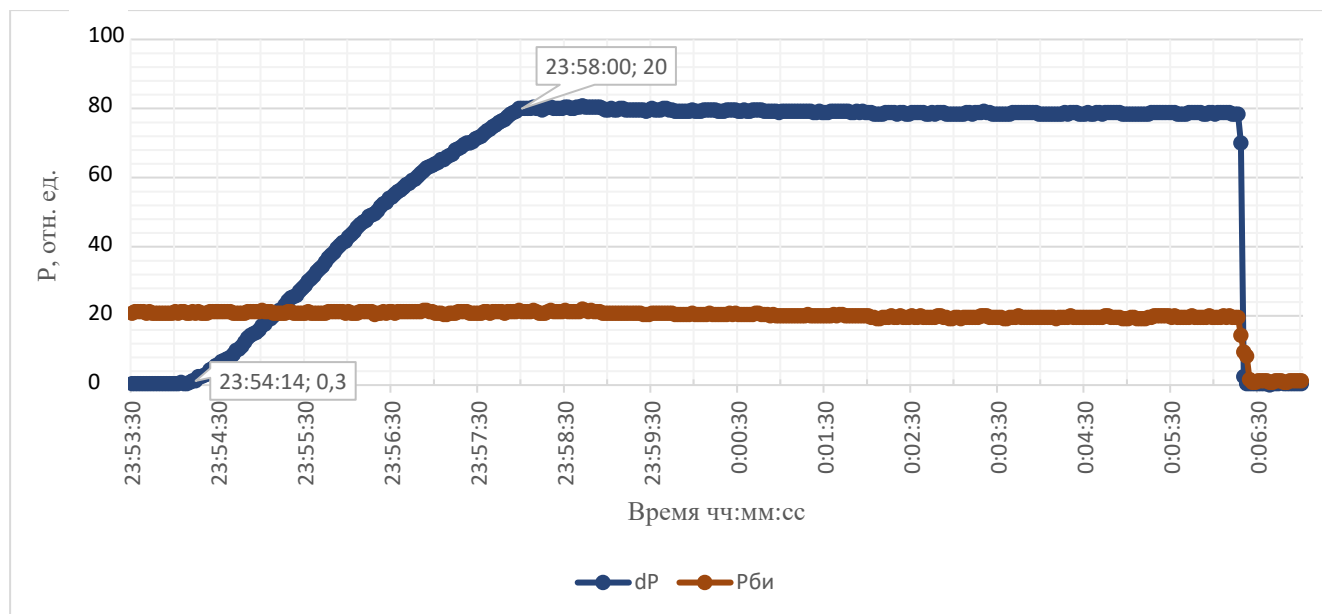


Рис. 14. Изменение перепада давления в капсуле и избыточного давления в испытательном баке во время эксперимента № 71 (2019 г.):
Рби – избыточное давление в испытательном баке, отн. ед.;
dP – перепад давления, отн. ед.



Рис. 15. Отобранная проба по результатам эксперимента № 80

5. Испытания по отработке программного обеспечения пробоотборника

Реализация всех функций МТК обеспечивается ПТК, в состав которого входят:

- компьютер с программным обеспечением (ПО), реализующим алгоритм управления пробоотборником, со специальным интерфейсом для взаимодействия с оператором и возможностью удаленного управления от автоматизированной системы верхнего уровня ЭБ;
- автоматизированный блок управления пробоотборником (модуль сбора данных и управления);
- каналы измерения технологических параметров элементов пробоотборника (температур, давлений, угла поворота вала);
- блок питания.

ПТК размещается частично в помещении защитного бокса пробоотборника (сенсорная панель связи оператора с компьютером, реализующим алгоритм управления компьютером, компьютер с ПО, модуль сбора данных и управления элементами МКП, блок питания), частично – непосредственно в защитном боксе (двигатели подачи и извлечения капилляра, их электромагнитные тормоза, электропривод шиберов, клапаны газового затвора ТТК и капилляра, энкодер угла поворота катушки МТК, датчики давления газа в ТТК и капилляре). Связь между частями аппаратуры осуществляется кабелями через герметичные проходки в стенках защитного бокса. Аппаратная часть ПТК построена на базе современных модулей общепромышленной автоматизации.

В соответствии с алгоритмом осуществления процесса отбора пробы (обеспечивающим, в частности, поддержание заданной температуры в ТТК,

поддержание давления газа в ТТК и капилляре, осуществление отбора пробы и мониторинг исправности собственных средств) был разработан прототип ПО управления пробоотборником.

Исходные коды прототипа ПО созданы с помощью среды разработки LabView, что делает работу ПО достаточно наглядной, обеспечивает легкость управления пробоотборником. Структура программного средства «Прототип ПО» приведена на рис. 16.

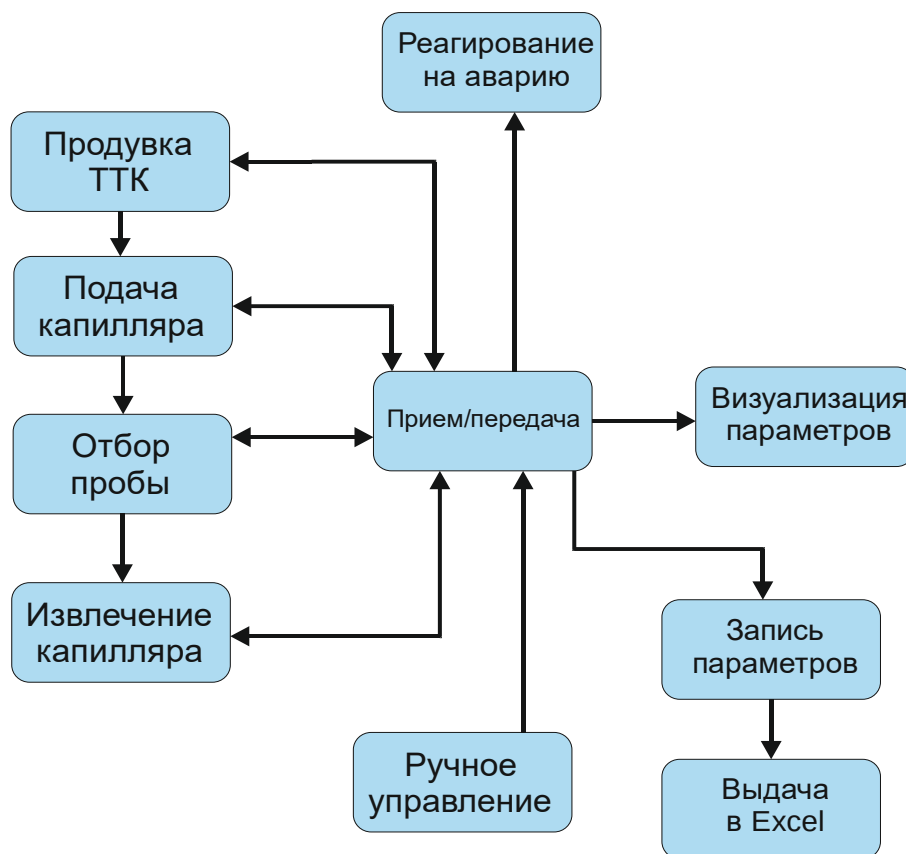


Рис. 16. Структура прототипа ПО

В той же среде LabView для экспериментальной (компьютерной) отработки режимов управления ПО управления пробоотборника был разработан имитатор автоматизированной части пробоотборника (далее – имитатор) – программное средство, имитирующее реакцию пробоотборника на команды, поступающие из прототипа ПО управления пробоотборником. Имитатор задает параметры отбора и выдает соответствующую реакцию оборудования МКП на управляющие воздействия от прототипа ПО.

Структура ПО имитатора пробоотборника приведена на рис. 17.

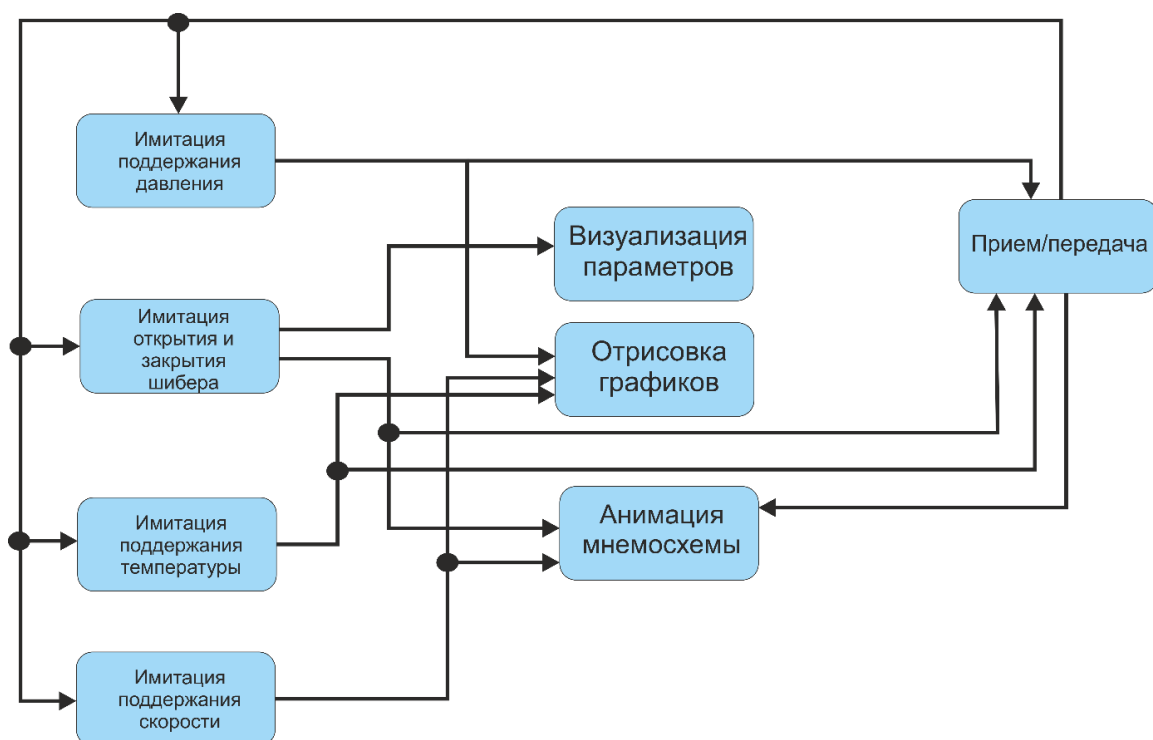


Рис. 17. Структура ПО имитатора

Испытательный стенд состоял из двух персональных электронно-вычислительных машин (ПЭВМ), расположенных в АО «НИКИЭТ». На ПЭВМ № 1 был установлен имитатор автоматизированной части пробоотборника, а на ПЭВМ № 2 – прототип программного обеспечения управления пробоотборником. Обе ПЭВМ связаны посредством локальной сети (Ethernet). Обмен данными производится по протоколу ТСР. Схема взаимодействия прототипа ПО и имитатора приведена на рис.18.



Рис. 18. Схема взаимодействия имитатора и прототипа ПО

Общий вид пользовательского интерфейса прототипа ПО управления пробоотборником приведен на рис. 19, имитатора пробоотборника – на рис. 20.

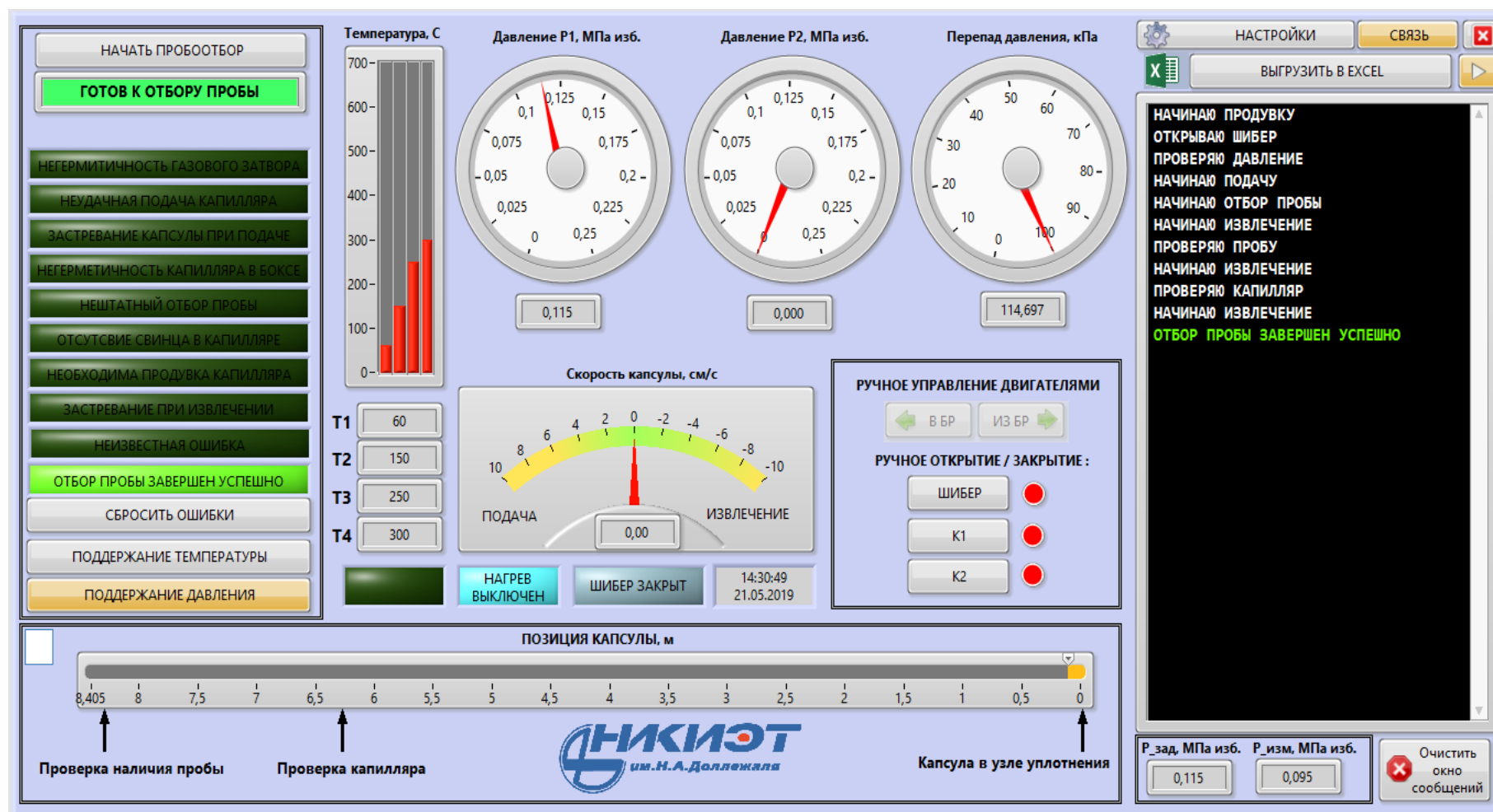


Рис. 19. Пользовательский интерфейс прототипа ПО управления пробоотборником

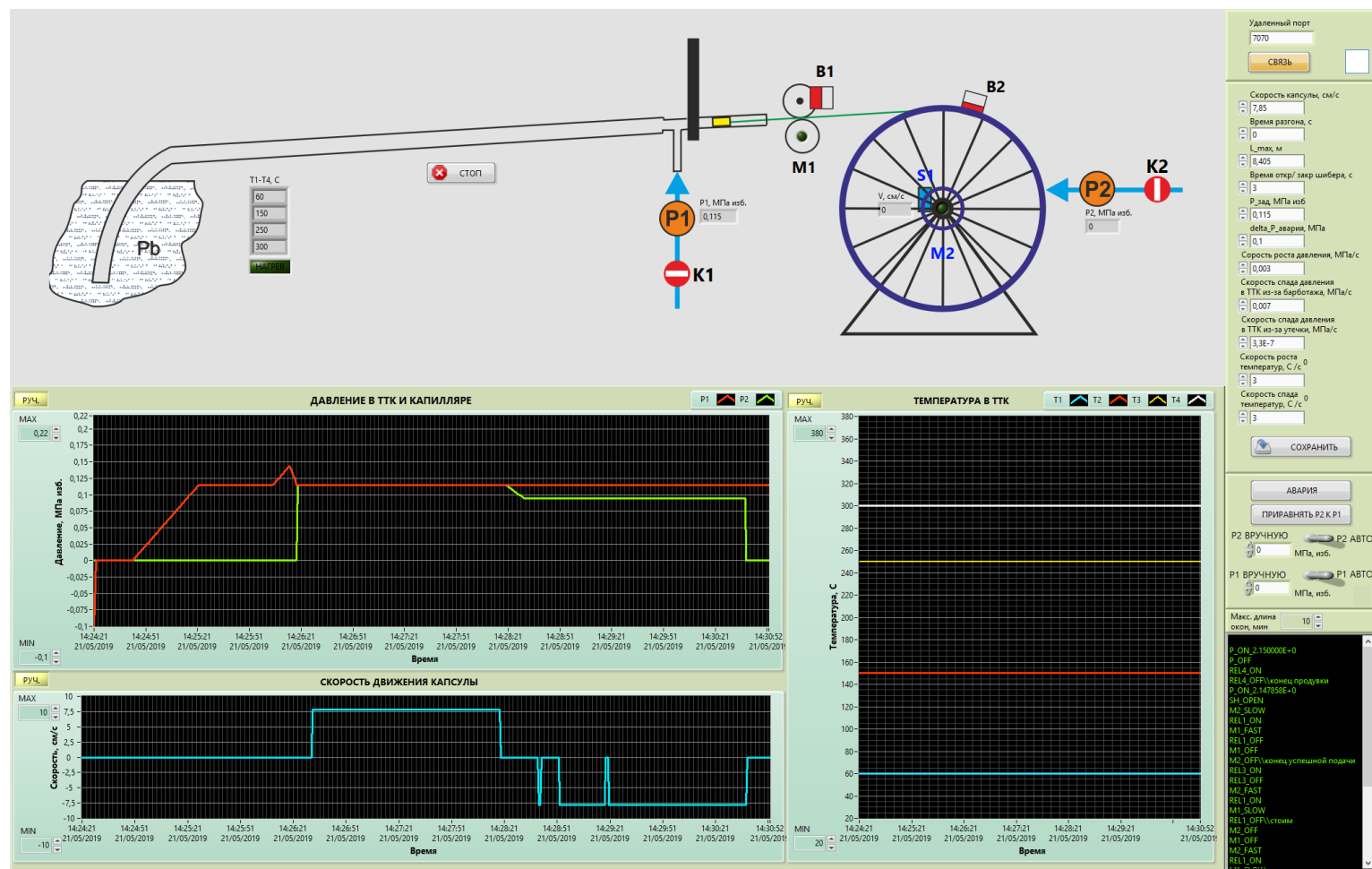


Рис. 20. Пользовательский интерфейс имитатора пробоотборника

Из основных элементов интерфейса прототипа ПО можно выделить: блок автоматического отбора пробы и индикации ошибок; блок индикации давлений, температуры и скорости подачи капилляра; блок настроек, выгрузки данных и связи; мнемосхему подачи капилляра; блок ручного управления отбором пробы; информационное окно.

Из основных элементов интерфейса имитатора можно выделить: мнемосхему (визуализирует изменение состояния элементов пробоотборника во время отбора пробы); блок графиков; блок настроек; окно вывода получаемых команд; блок имитации исходных событий.

В процессе проведенных в 2019 г. испытаний [9], по результатам первых этапов отработки была осуществлена корректировка алгоритма отбора пробы, выработаны рекомендации по доработке прототипа ПО управления пробоотборником. В качестве основных полученных результатов можно отметить:

- программа предварительных испытаний прототипа программного обеспечения управления пробоотборником РУ БРЕСТ-ОД-300 выполнена в полном объеме (проведено 5 этапов компьютерной отработки ПО);

- подтверждена стабильная работа ПО в режиме автоматического отбора пробы (каждый из 12 запланированных программой режимов испытаний был отработан в объеме минимум 6 повторений для определения устойчивости результатов);

- режим ручного управления пробоотборником отработан в объеме 7 повторений;
- отработан режим функционирования прототипа ПО при нарушении НЭ РУ (авария с повышением давления в газовой полости БР). Рассмотрены два варианта аварийной ситуации: в процессе пробоотбора и в режиме ожидания (проведено 17 испытаний);

- в ходе испытаний неоднократно продемонстрирована работоспособность функции выгрузки значений параметров отбора пробы во внешний файл формата MS EXCEL;

- заметно расширен функционал ПО управления пробоотборником: введены необходимые блокировки, введено автоматическое сохранение файлов по окончании каждого отбора пробы. Дополнительно, в помощь оператору, введено звуковое сопровождение отбора пробы.

Заключение

Разработан технический проект инновационной конструкции пробоотборника РУ БРЕСТ-ОД-300 (с боковым наклонным, практически горизонтальным расположением пробоотборного канала), обеспечивающей возможность выполнения пробоотбора СТ в любой период эксплуатации как на остановленной, так и на работающей РУ (без ее остановки). Конструкция защищена двумя патентами на изобретение РФ. Экономическая эффективность предложения, оцененная за счет сокращения времени простоя РУ БРЕСТ-ОД-300, составит около 8,9 млрд руб. за 30 лет эксплуатации РУ.

Работоспособность конструкции подтверждается тепловыми, прочностными и радиационными расчетами, а также экспериментальными работами: по загрузке-выгрузке трубки транспортировки капилляра и капилляра пробоотборного в полномасштабный имитатор пробоотборного канала РУ БРЕСТ-ОД-300 с изогнутым ложементом; испытаниями по отбору проб СТ капсулами капилляров пробоотборных в натурном (изогнутом) исполнении трубки транспортировки капилляра; предварительными (компьютерными) испытаниями прототипа программного обеспечения управления пробоотборником.

Проведенные испытания подтверждают возможность отбора проб в автоматическом режиме без присутствия оператора в помещении защитного бокса (его участие потребуется лишь для доставки отобранной пробы из этого помещения

в радиохимическую лабораторию ЭБ), что сводит к минимуму дозу получаемого персоналом облучения.

Последующие намеченные на ближайший период испытания других отдельных узлов конструкции (электронагревателя, механизма транспортировки капилляра) позволят перейти к завершающим приемочным испытаниям опытного образца.

Полученные по основным проблемным вопросам разработки результаты дают уверенность в завершении обоснования пробоотборника в полном требуемом объеме в срок, обеспечивающий намеченный на 2026 г. пуск РУ.

Список литературы

1. Драгунов Ю.Г., Лемехов В.В., Моисеев А.В., Смирнов В.С., Ярмоленко О.А., Васюхно В.П., Черепнин Ю.С. Технический проект РУ БРЕСТ-ОД-300: этапы разработки и обоснование // IV МНТК «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики»: сб. докл. М.: АО «НИКИЭТ», 2016. Т. 1. С. 21–30.
2. Устройство для отбора проб расплавленного металла: пат. 24730 Рос. Федерация: МПК51 G01N1/00 / Безносков А.В., Камнев М.А., Бокова Т.А., Пинаев С.С.; заявитель и патентообладатель НГТУ. – № 2002103896/20, заявл. 11.02.2002; опубл. 20.08.2002, Бюл. № 23. – 8 с.
3. Архипов В.М. Техника работы с натрием на АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 76.
4. Устройство для отбора проб жидкометаллического теплоносителя ядерного реактора, в котором выполнен канал для отбора проб: пат. 2591165 Рос. Федерация: МПК51 G01N1/20 / Жуков И.В., Лемехов В.В., Моркин М.С., Ярмоленко О.А.; заявитель и патентообладатель РФ в лице ГК «Росатом». – № 1015120846/05; заявл. 01.06.2015; опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19. – 7 с.
5. В.А. Гуров, М.С. Моркин, О.А. Ярмоленко. Техническое предложение по пробоотборнику РУ БРЕСТ-ОД-300// Годовой отчет АО «НИКИЭТ» – 2017: М., АО «НИКИЭТ», 2017. С. 27.
6. О.А. Ярмоленко, М.С. Моркин, А.А. Бажанов, Н.В. Дербенева. Технический проект пробоотборника РУ БРЕСТ-ОД-300// Годовой отчет АО «НИКИЭТ» – 2019: М., АО «НИКИЭТ», 2019. С. 21–30.
7. Устройство для отбора проб расплавленного металла: пат. 2625244 Рос. Федерация: МПК G01N1/14 / В.А. Гуров, М.С. Моркин, О.А. Ярмоленко; заявитель и патентообладатель РФ в лице ГК «Росатом». – № 2016137055; заявл. 2016.09.15; опубл. 2017.07.12.
8. Устройство для отбора проб расплавленного металла: пат. 2640240 Рос. Федерация: МПК G01N1/20 / В.А. Гуров, В.В. Лемехов, М.С. Моркин, О.А. Ярмоленко; заявитель и патентообладатель РФ в лице ГК «Росатом». – № 2017108849; заявл. 16.03.2017; опубл. 2017.12.27, Бюл. № 36.
9. Колмогорцев А.В., Михайлов А.В., Моркин М.С., Ярмоленко О.А. Разработка и испытания прототипа программного обеспечения управления пробоотборником для системы контроля герметичности оболочек реактора БРЕСТ// Конференция молодых специалистов. «Инновации в атомной энергетике»: сб. докл. М.: АО «НИКИЭТ», 2019. С. 520–530.