

## МЕТОДОЛОГІЯ СТРАТЕГІЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ПРИ ВИВЕДЕННІ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ВИКОРИСТАННЯ АТОМНОЇ ЕНЕРГІЇ

А.А. Саркісов, С.В. Антіпов, В.Л. Висоцький, **Р.І. Калінін**,  
М.Н. Кобрінський, П.О. Шведов

Викладається методологія стратегічного планування робіт при виведенні з експлуатації об'єктів використання атомної енергії на прикладі розробки Стратегічного майстер-плану утилізації й екологічної реабілітації виведених з експлуатації об'єктів атомного флоту Росії.

## STRATEGIC PLANNING METHODOLOGY at the REMOVING of SERVICE the NUCLEAR POWER OBJECTS

A. Sarkisov, S. Antinov, V. Vysotsky, **R. Kalinin**, M. Kobrinsky, P. Schvedov

Strategic works planning methodology at the removing of service the nuclear power objects at the example of Strategic Master-Plan (SMP) development for utilization and ecological rehabilitation of the Russian atomic marine revealed objects has been described.

### Список использованных источников

1. *Антипов С.В.* Радиоэкологические последствия эксплуатации и утилизации объектов атомного флота в Дальневосточном регионе / С.В. Антипов [и др.]. – М.: Наука, 2010. – 387 с.

2. *Саркисов А.А.* Стратегические подходы к решению экологических проблем, связанных с выведенными из эксплуатации объектами атомного флота на Северо-Западе России / А.А. Саркисов [и др.]. – М.: Наука, 2008. – 346 с.

3. *Саркисов А.А.* Инженерные основы теории и эксплуатации судовых ядерных реакторов / А.А. Саркисов, Л.Б. Гусев, Р.И. Калинин. – М.: Наука, 2010 – 549 с.

Надійшла до редакції 08.02.2013 р.  
Після доопрацювання 21.02.2013 р.

УДК 621.039.586

## ТЕРМОСИФОННЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК СПОТ ПЕРВОГО КОНТУРА ВВЭР-1000

И.И. Свириденко<sup>1</sup>, А.К. Сухов<sup>2</sup>, Д.В. Шевелев<sup>3</sup>, А.В. Поляков<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Севастопольский национальный технический университет;

<sup>2</sup>Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности;

<sup>3</sup>Научно-технический центр НАЭК «Энергоатом», г. Севастополь;

<sup>4</sup>Международное агентство по атомной энергии, г. Вена

Рассмотрен теплообменник на основе двухфазных термосифонов автономной системы пассивного отвода остаточного тепловыделения реакторной установки АЭС с ВВЭР, обеспечивающей отвод теплоты от первого контура. Приведены особенности конструкции теплообменника, его преимущества, рассмотрена технология изготовления теплообменника и заправки термосифонов промежуточным теплоносителем. Представлены экспериментальные и расчетные характеристики термосифонного теплообменника.

## Введение

Внедрение систем пассивного отвода остаточного тепловыделения (СПОТ) в состав систем безопасности реакторной установки (РУ) является одним из эффективных мероприятий по повышению безопасности АЭС в условиях запроектной аварии с полным длительным обесточиванием. Отсутствие подобных систем может привести к катастрофическим последствиям в условиях экстремальных внешних воздействий.

Практическим подтверждением этому стала тяжелая авария на японской АЭС «Фукусима Дайичи», где в результате потери основных и аварийных источников электроснабжения от воздействия цунами, вызванного землетрясением 11 марта 2011 г., был нарушен отвод остаточного тепловыделения РУ и приреакторных бассейнов выдержки (БВ). Авария произошла из-за перегрева, испарения и связанной с этим потери уровня теплоносителя в активных зонах и воды, охлаждающей топливо в БВ, с последующим перегревом и повреждением ядерного топлива, а в активных зонах – его плавлением с повреждением корпусов реакторов и их защитных оболочек. Пароциркониевая реакция на поверхности оболочек ТВЭЛ привела к образованию и накоплению водорода с последующим его взрывом и пожарами.

Предлагаемые для исключения такого развития аварии схемы СПОТ отличаются по принципу действия, типу применяемого теплообменного оборудования, механизму ввода в действие. Одним из эффективных способов организации пассивного отвода теплоты являются применение испарительно-конденсационных устройств замкнутого типа – двухфазных термосифонов (ДТС). Впервые использовать теплообменное оборудование на основе ДТС для систем аварийного отвода теплоты РУ АЭС с ВВЭР было предложено в Украине в 2001 году на Международной конференции «Стратегия развития ядерной энергетики: выбор Украины» [1]. В последующий период была разработана принципиальная и компоновочная схема СПОТ первого контура для РУ с ВВЭР-1000/В-320 [2], предложена схема термосифонного теплообменника аварийного расхолаживания (ТОАР) и запатентована схема пассивного ввода в действие СПОТ РУ при аварии с полным длительным обесточиванием [3], рассмотрены варианты схем подключения СПОТ к РУ [4], а также схема системы пассивной тепловой защиты конечного поглотителя – воды в баке аварийного отвода теплоты (БАОТ) в условиях низких температур [5]. Кроме этого, была разработана система пассивного расхолаживания компенсатора давления (СПР КД) с использованием термосифонного теплообменного аппарата (ТОА) [6].

Методом расчетного моделирования получены переходные характеристики аварийного режима отвода остаточных тепловыделений РУ с ВВЭР-1000 автономной термосифонной СПОТ в условиях полного длительного (не менее 72 часов) обесточивания. Результаты расчетов показали эффективность и надежность расхолаживания РУ термосифонной системой, а также возможность поддержания в безопасном состоянии активной зоны в рассматриваемых аварийных условиях [7]. Для условий плотного первого контура и «малых» течей теплоносителя были продемонстрированы преимущества совместного функционирования СПОТ РУ и СПР КД, формирующих опережающий темп снижения давления теплоносителя по отношению к снижению его температуры с сохранением необходимого запаса до кипения. Этим обеспечивается поддержание безопасного состояния активной зоны до подключения пассивной части САОЗ, а впрыск борного концентрата от штатных пассивных САОЗ, в свою очередь, предотвращает достижение повторной критичности при отводе остаточного тепловыделения термосифонной СПОТ, причем без необходимости увеличения эффективности СУЗ либо установки дополнительных систем, воздействующих на реактивность [8].

### Постановка цели исследования

Анализ эксплуатационной надежности систем аварийного охлаждения РУ показывает, что именно теплообменное оборудование является элементом с наиболее вероятным возникновением течи 1-го контура. Например, течь одной теплообменной трубки парогенератора (ПГ) или кожухотрубного ТОАР системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) приводит к выходу радиоактивных загрязнений за пределы барьеров безопасности. Причем в условиях полного обесточивания, обеспечивающего отвод теплоты от 1-го контура во 2-й, прямым следствием течи в трубной системе либо в соединении труб с коллектором является распространение радиоактивности в окружающую среду.

ТОАР с ДТС надежно разделяет теплоносители смежных контуров, так как их теплопередающие поверхности имеют независимые друг от друга участки подвода и отвода теплоты. Настоящая работа является продолжением перечисленных выше исследований по созданию автономной СПОТ РУ АЭС с ВВЭР-1000 с теплообменным оборудованием на основе ДТС. Ее целью является анализ конструктивных особенностей термосифонного теплообменного аппарата, позволяющих его применять в качестве ТОАР в СПОТ РУ с ВВЭР, а также особенностей технологии его изготовления и эксплуатации.

### Применение термосифонного теплообменного оборудования для отвода остаточного тепловыделения ВВЭР-1000

Теплообменное оборудование с ДТС позволяет создать систему автономных промежуточных участков теплоотвода между радиоактивным источником тепловыделения и охлаждающей средой, которая, помимо эффективного теплоотвода в аварийных ситуациях, обеспечивает экологическую безопасность и надежную защиту персонала и населения от возможного распространения радиоактивных загрязнений. Основное преимущество термосифонного теплообменного оборудования состоит в использовании теплопередающей поверхности в виде сборки ДТС, которая является автономным замкнутым промежуточным участком теплопереноса и обеспечивает надежность разделения теплоносителя 1-го контура и контура охлаждения. Их теплопередающие поверхности имеют независимые друг от друга участки подвода и отвода теплоты (рис. 1).

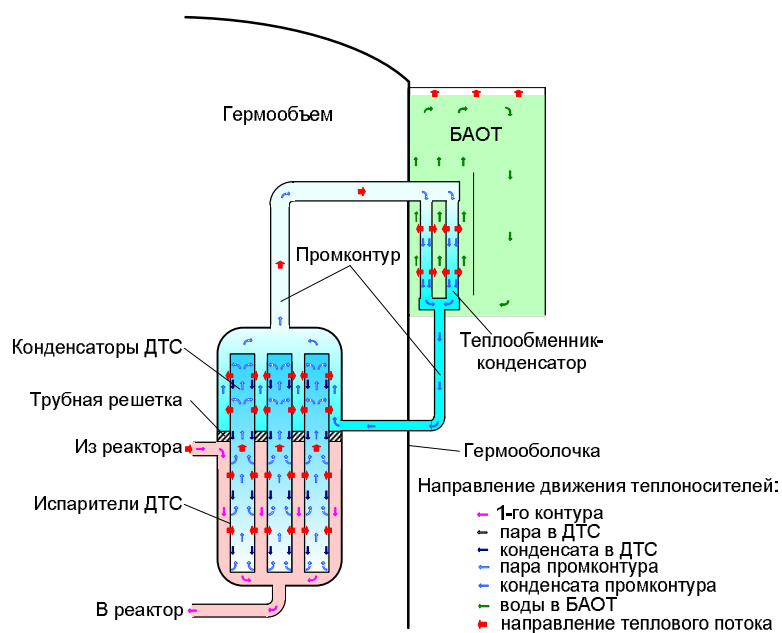


Рис. 1. Организация теплоотвода в СПОТ с термосифонным ТОАР

Показатели надежности ТОАР с ДТС выше соответствующих показателей традиционных кожухотрубных теплообменников [9]. Разгерметизация одного или нескольких ДТС не сказывается на работоспособности ТОАР, а следовательно, и всей системы теплоотвода, поэтому сборку ДТС можно рассматривать как систему параллельно включенных автономных элементов теплопереноса.

Свободное термическое расширение испарительного и конденсационного участков ДТС не приводит к деформации конструктивных элементов ТОАР в условиях резкого изменения температуры рабочих сред, что позволяет их использовать в системе аварийного расхолаживания РУ, характеризующейся большими скачками тепловых нагрузок при вводе СПОТ в действие. Теплоперенос в ДТС осуществляется передачей скрытой теплоты парообразования промежуточного теплоносителя, поэтому термосифонное теплообменное оборудование имеет высокую эффективную теплопроводность и изотермичность поверхности при низком внутреннем термическом сопротивлении. По полости теплоподводящего и теплоотводящего теплоносителей ТОАР с ДТС имеет относительно небольшое внешнее гидравлическое сопротивление, что особенно важно для систем аварийного теплоотвода с естественной циркуляцией теплообмениваемых сред. Благодаря отсутствию камер для подвода и отвода внешних теплоносителей термосифонные ТОАР обладают высокой компактностью. Это позволяет их разместить в составе РУ при тесной компоновке основного оборудования и трубопроводов.

Таким образом, ТОАР с ДТС удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к теплообменному оборудованию СПОТ: обеспечивать безопасность, высокую надежность и эффективность отвода теплоты. На рис. 2 изображена компоновка СПОТ первого контура РУ ВВЭР-1000. Петли расхолаживания СПОТ с термосифонными ТОАР размещают в боксах ПГ, ориентация ТОАР – вертикальная. По высоте ТОАР размещают таким образом, чтобы его участок подвода теплоты со стороны 1-го контура был расположен не выше уровня верхних трубопроводов САОЗ. Это исключает появление нежелательных П-образных вертикальных «карманов», в которых возможно накопление неконденсирующегося газа – азота после срабатывания гидроемкостей (ГЕ) САОЗ [10].

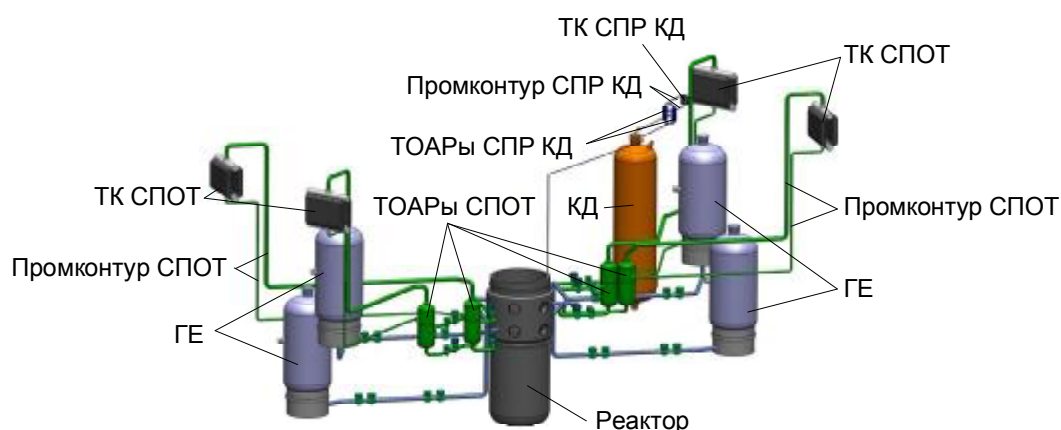


Рис. 2. Компоновка СПОТ и СПР КД с термосифонными теплообменниками в составе РУ АЭС с ВВЭР-1000 (гермооболочка, БАОТы и часть элементов РУ условно не показаны)

ТОА СПР КД размещают таким образом, чтобы высота расположения входного (верхнего) патрубка ТОА относительно верха КД составляла около 5 м. Места подключений и диаметры соединительных трубопроводов выбирают, исходя из возможности врезки в существующие трубопроводы аварийного газоудаления из КД и из-под верхнего блока реактора.

### Конструктивные особенности термосифонного теплообменника СПОТ

Устройство термосифонного ТОАР изображено на рис. 3. Его теплообменная поверхность формируется сборкой из 1519 обычных цилиндрических ДТС наружным диаметром  $(25 \times 2,5) \cdot 10^{-3}$  м, длиной испарителя – 1,5 м, конденсатора – 1,0 м, поверхностью теплообмена со стороны 1-го контура –  $179,7 \text{ м}^2$ , со стороны промконтура –  $120 \text{ м}^2$ , соответственно. Относительный шаг сборки ДТС в треугольной трубной решетке составляет  $1,34 d_{\text{ДТС}}^{\text{нар}}$ , абсолютный – 0,0335 м. Теплообменная поверхность ТОА СПР КД формируется сборкой из 121 ДТС таких же размеров, как и в ТОАР СПОТ.

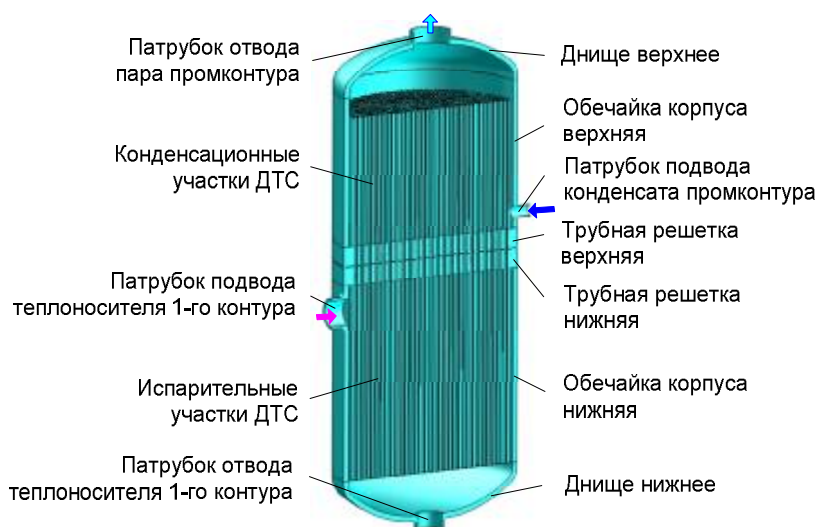


Рис. 3. Термосифонный ТОАР (разрез)

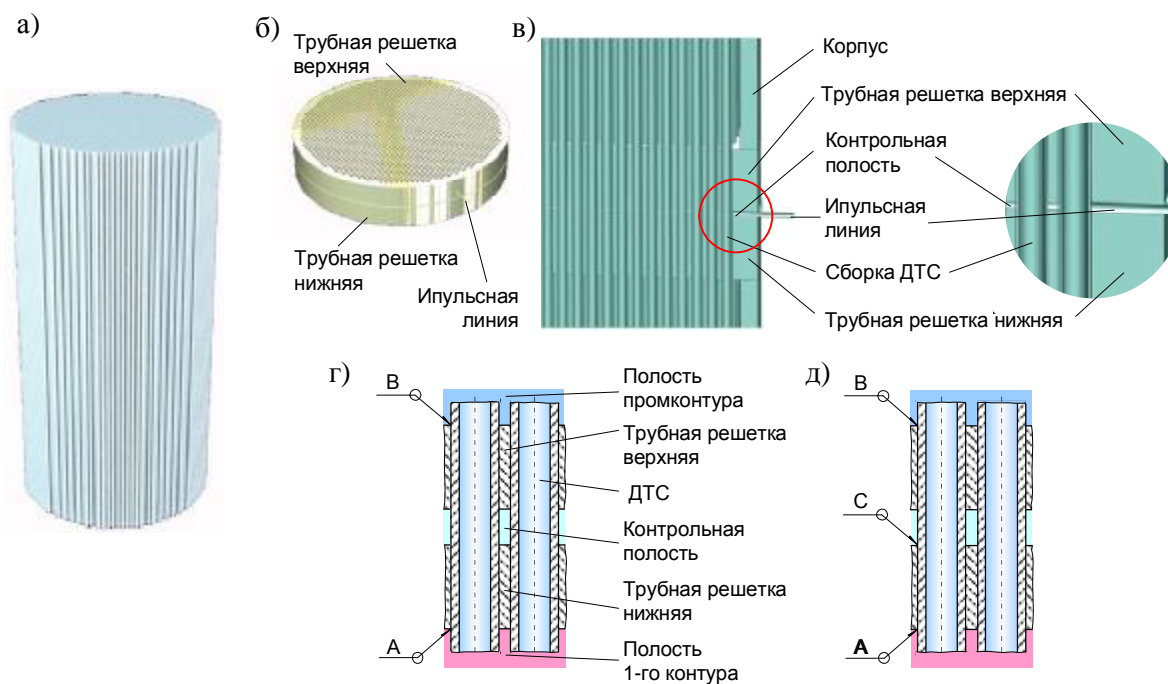


Рис. 4. Элементы термосифонного ТОАР: а – пучок обычных ДТС; б – двойная трубная решетка; в – узел крепления ДТС в трубной решетке и вывод импульсной линии контроля межконтурной плотности; г, д – варианты сварных соединений ДТС с трубными решетками

Несущим элементом сборки ДТС (рис. 4, а) является центральная трубная решетка, которая в целях повышения надежности теплообменника и недопущения межконтурной течи (проникновения 1-го контура в промконтур) выполнена двойной (рис. 4, б). Контроль межконтурной плотности в ТОАР обеспечивается специальной импульсной линией, соединенной с полостью между верхней и нижней трубными решетками (рис. 4, в).

ТОАР имеет цельносварной корпус, состоящий из верхней и нижней цилиндрических обечаек, верхнего и нижнего торцевых эллиптических днищ. На образующих цилиндрического корпуса размещены патрубки для подвода горячего теплоносителя первого контура и конденсата из промконтура, а на торцевых эллиптических днищах – патрубки для отвода охлажденного первого контура и пара промконтура соответственно. Материал элементов корпуса ТОАР и обычных ДТС – сталь 12Х18Н10Т.

### Технология сборки теплообменника и заправки ДТС

Крепление термосифонов в трубной решетке производится аргонодуговой сваркой. В зависимости от типа применяемой сварки - ручной или автоматической - возможны два варианта выполнения сварных соединений ДТС с трубными решетками.

Первый вариант предусматривает использование ручной или автоматической аргонодуговой сварки. Технология крепления термосифонов ручной аргонодуговой сваркой была разработана и реализована на Севастопольском морском заводе им. С. Орджоникидзе при изготовлении экспериментального термосифонного теплообменника системы аварийного расхолаживания (рис. 5). В техпроцессе использовалась специальная технологическая оснастка, изготовленная в заводских условиях.

Сварка тридцати одного термосифона (рис. 5, а) с центральной трубной решеткой выполнялась с двух сторон. Затем на термосифонную сборку (рис. 5, б) монтировались верхний и нижний цилиндрические кожухи с приваренными патрубками.

Далее на верхнем кожухе выполнялись установка и обварка штуцеров заправочных штенгелей (на реальном теплообменнике штенгели остаются в полости теплообменника и штуцеров не имеют). Заключительной сборочной операцией была сварка трубной решетки с верхним и нижним кожухами.

Перед монтажом на стенд собранного теплообменника (рис. 5, в) проводились его гидравлические испытания давлением 25 МПа. Заправка и перезаправка ДТС теплоносителем выполнялись на стенде. В натуральных теплообменниках применяется двойная трубная решетка, поэтому перед монтажом термосифонного пучка выполняется сварка трубных решеток между собой. Затем уже в сваренной двойной трубной решетке устанавливаются ДТС, и производится их сварка с решетками:

один сварочный шов выполняется со стороны первого контура на нижней поверхности нижней трубной решетки, второй – со стороны промконтура на верхней поверхности

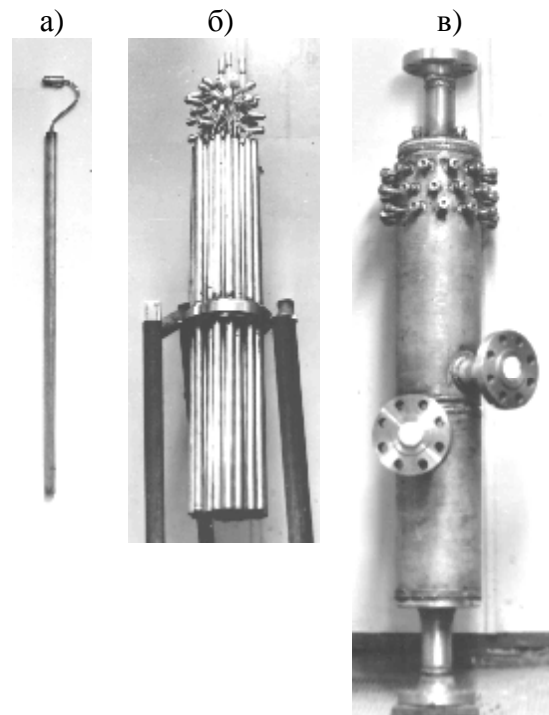


Рис. 5. Экспериментальный термосифонный теплообменник

верхней трубной решетки (см. рис. 4, г). Монтаж и сварка термосифонов в пучке выполняются последовательно от центрального ДТС по спирали к периферии. В этом случае обеспечиваются необходимые условия для ручной сварки.

Второй вариант выполнения сварных соединений термосифонов с трубными решетками предусматривает использование ручной и автоматической сварки. ДТС монтируются на нижней трубной решетке под сварку, верхняя трубная решетка используется только для их центровки. Производится автоматическая сварка ДТС с нижней решеткой со стороны 1-го контура. Со стороны межрешеточной полости сварку выполняют в ручном режиме. Так собирается весь пучок термосифонов, после чего опускается верхняя трубная решетка и проводится ее сварка с нижней решеткой. Затем автоматической сваркой выполняется соединение ДТС с верхней трубной решеткой со стороны промконтура. После завершения сварочных операций производятся гидравлические испытания со стороны межрешеточной полости для проверки соединений ДТС с трубными решетками.

Предложенная технология позволяет в теплообменнике между полостями 1-го контура и промконтура иметь три сварных соединения, что обеспечивает более высокую надежность разделения смежных контуров (см. рис. 4, д). Однако для ее реализации в условиях достаточно тесного пучка с межтрубным зазором 8,5 мм необходимы разработка и изготовление специальной технологической оснастки.

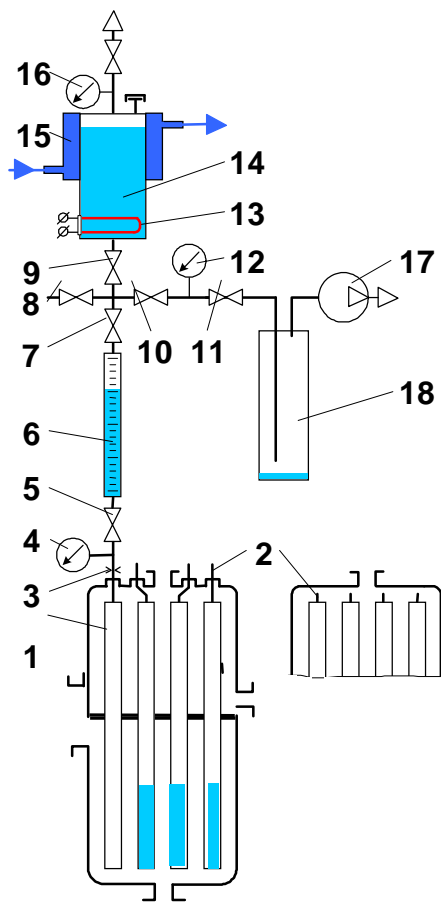


Рис. 6. Схема станда заправки теплоносителем ДТС

После сборки термосифонного пучка с трубной решеткой производится заправка ДТС теплоносителем. В качестве промежуточного теплоносителя ДТС используется вода высокой чистоты (бидистиллят).

Для заправки термосифонов применяется метод предварительного вакуумирования. На рис. 6 изображена схема заправочного станда, с помощью которого осуществлялась заправка ДТС экспериментального ТОАР. Технологический процесс заправки состоит из последовательно выполняемых операций: 1) предварительного вакуумирования станда и ДТС; 2) последующей заправки и герметизации ДТС.

Перед началом заправки заполняется теплоносителем и герметизируется дегазатор 14. Для удаления растворенных в теплоносителе газов проводится его дегазация кипячением электронагревателем 13. Последующее вакуумирование полости дегазатора осуществляется охлаждением водой, циркулирующей через проточный теплообменник 15.

Заправляемый ДТС соединяется со стандом заправки штангелем 2. Клапаны 5, 7, 10, 11 – открыты, 8 и 9 – закрыты. Полости заправляемого термосифона 1 и станда вакуумируются форвакуумным насосом 17 и проверяются на герметичность. Герметичность ДТС контролируется по показаниям вакуумметра 4, станда – вакуумметров 12 и 16 соответственно.



Для заполнения стеклянной мерной емкости теплоносителем клапаны 5 и 10 закрываются, клапан 9 – открывается. Так как разрежение в полости дегазатора 14 несколько меньше, чем в полости мерной емкости 6, теплоноситель из дегазатора поступает в мерную емкость, после чего, клапан 7 закрывается. Далее открывается клапан 5 и теплоноситель из мерной емкости 6 поступает в полость заправляемого термосифона 1. Количество заправляемого теплоносителя контролируется по шкале мерной емкости 6, после чего клапан 5 закрывается. Заправочный штенгель 2 пережимается в двух местах специальным устройством 3, отсоединяется от стенда, и его торец заваривается. Далее заправочный стенд подсоединяется к следующему термосифону.

Элементы стенда изготовлены из стали 12Х18Н10Т. Для предотвращения заброса теплоносителя в вакуум-насос при последующем вакуумировании стенда применяется отстойник 18. Клапаны стенда заправки 7, 8, 9, 10, 11 – вакуумные, заправочный клапан 5 – игольчатый.

Подобная технология предлагается для заправки ДТС при промышленном производстве термосифонного теплообменного оборудования СПОТ и СПР КД, а также ТОА с ДТС другого назначения. Для повышения точности и надежности заправки в условиях массового производства стенд должен быть оснащен автоматизированным дозатором теплоносителя и автоматом для глушения и заварки заправочных штенгелей.

После заправки теплоносителем термосифонная сборка (рис. 7, а) собирается с нижним (рис. 7, б) и верхним (рис. 7, в) кожухами. Проводятся гидравлические испытания собранного теплообменника.

В собранном и заправленном состоянии теплообменник поставляется на энергоблок АЭС для монтажа в составе РУ. После монтажа теплообменника проводятся его гидравлические испытания в составе систем.

### **Расчетное моделирование теплопереноса в термосифонном теплообменнике СПОТ**

Расчетное моделирование процессов теплопереноса в СПОТ проведено на модели РУ с ВВЭР-1000/В-320 с использованием теплогидравлического кода RELAP-5/MOD3.2 в целях верификации модели термосифонного ТОАР и уточнения его характеристик.

На рис. 8 приведен баланс тепловыделения в активной зоне ВВЭР-1000 и теплоотвода четырехпетлевой СПОТ с термосифонными ТОАР. Из рисунка видно, что до 35300-й секунды переходного процесса теплоотводящая способность СПОТ существенно превышает уровень остаточного тепловыделения РУ. В этот период СПОТ, помимо реактора, расхолаживает и ПГ. На 35300-й с теплоотвод СПОТ соответствует тепловыделению в активной зоне и в дальнейшем, практически до 190000-й с, уровень теплоотвода СПОТ поддерживается на 5...10 % ниже остаточного тепловыделения активной зоны. Эти 5...10 % теплоты отводятся в ГО за счет тепловых потерь с поверхности основного оборудования РУ (ГЦТ, ПГ и др.), а также расходуются на нагрев более холодного борного концентрата, поступающего из ГЕ САОЗ (см. ниже). Начиная с 190000-й с и до окончания рассматриваемого переходного процесса (трое суток) отвод всей остаточной теплоты РУ осуществляется только СПОТ.

Наблюдаемые незначительные осцилляции теплоотвода СПОТ обусловлены влиянием слива холодного раствора из ГЕ [11], а также неустойчивости двухфазного потока в промконтуре СПОТ и во втором контуре ПГ [7]. Однако на устойчивость процесса теплоотвода от РУ эти осцилляции существенного влияния не оказывают.



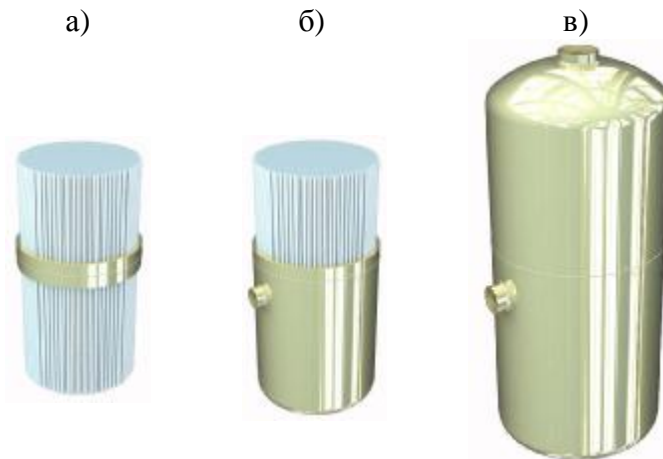


Рис. 7. Последовательность сборки термосифонного ТОАР СПОТ:  
а – сборка ДТС с трубной решеткой; б – сборка ДТС с трубной решеткой и нижним кожухом; в – ТОАР в сборе

Уровень и характер теплоотвода термосифонными ТОАРАми по всем четырем петлям СПОТ в течение всего переходного процесса практически одинаков (рис. 8).

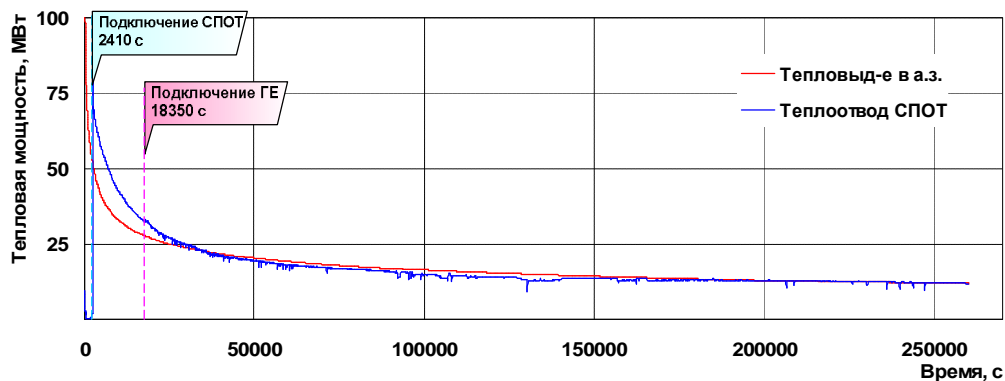


Рис. 8. Баланс тепловыделения в активной зоне и теплоотвода СПОТ

Незначительные осцилляции в характере теплоотвода ТОАРОВ зафиксированы только после 18350-й секунды (рис. 9, а), когда подключаются ГЕ СОАЗ и в первый контур и соединительные трубопроводы ТОАР поступает холодный борный концентрат, что приводит к проявлению «обратных связей».

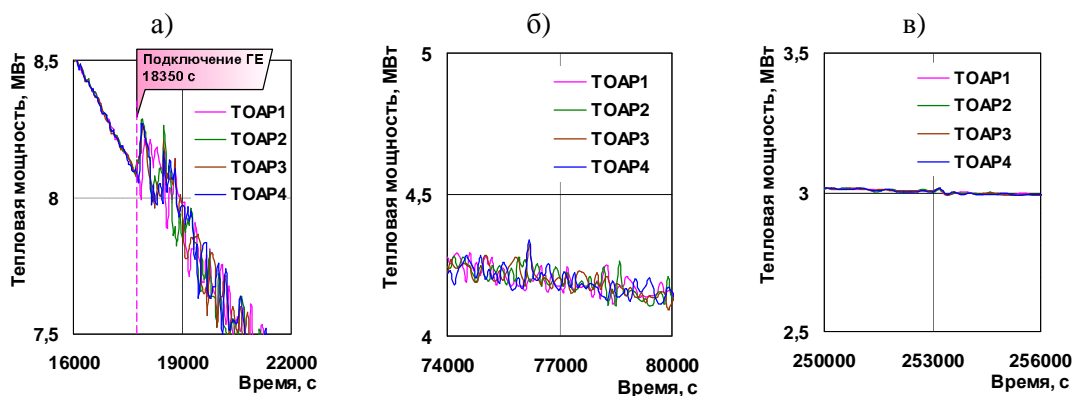


Рис. 9. Теплоотвод термосифонными ТОАР на различных этапах процесса аварийного расхолаживания

По мере снижения температуры первого контура и уменьшения расхода слива холодного раствора из ГЕ это влияние сокращается, и осцилляции уменьшаются (рис. 9, б), а к завершению рассматриваемого переходного процесса практически исчезают (рис. 9, в).

Поскольку основной характеристикой ДТС является предельная теплопередающая способность, с учетом принятых при расчетном моделировании СПОТ начальных условий и режимных характеристик проведено сравнение полученной теплопередающей способности ДТС с данными теплофизических испытаний экспериментального ТОАР [9]. Зависимость принятого в расчете предельного теплового потока от геометрических размеров ДТС соответствует результатам, полученным нами на теплофизическом стенде и крупномасштабном экспериментальном стенде [12], а также результатам работ Безродного М.К. [13] (рис. 10), Толубинского В.И., Пиоро И.Л. [14, 15] и Имуры Х. [16].

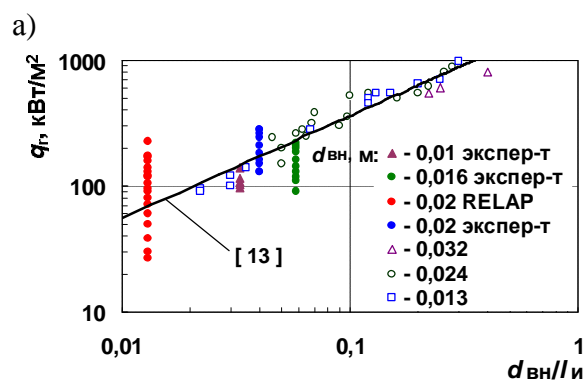


Рис. 10. Зависимость плотности предельного теплового потока от размеров испарителя ДТС

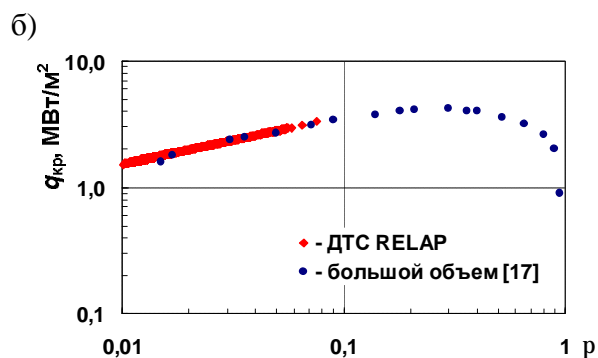


Рис. 11. Зависимость критической плотности теплового потока от приведенного давления

На рис. 11 представлен характер зависимости критической плотности теплового потока в модели ДТС от приведенного давления в сравнении с расчетными данными, полученными для условий кипения в большом объеме Безродным М.К. [13]. Известно, что давление в ДТС существенным образом влияет на предельный тепловой поток и, по данным [13], рост  $q_{кр}$  имеет место лишь до  $p = (0,2 \dots 0,3)p_{кр}$ . Как видно из рисунка, характер полученной нами расчетной зависимости практически полностью соответствует результатам [13], с той лишь разницей, что моделируемый в нашем случае режим в испарителе ДТС не достигает предельного значения теплового потока. Более чем трехкратный запас до достижения  $q_{кр}$  подтверждает надежность теплопереноса для условий, принятых в расчетной модели ординарного ДТС.

Степень заполнения теплоносителем ДТС, принятая 60 % объема испарителя, выбрана в соответствии с результатами экспериментальных исследований влияния заполнения ДТС на теплопередающую способность, проведенных на крупномасштабном и теплофизическом стендах, а также данными, собранными в [18], с рекомендациями заполнения всего объема ДТС в пределах 30...33 %, при условии, что внутренние объемы испарителя и конденсатора соизмеримы.

Отличия в тепловых потоках, полученных нами на экспериментальной сборке ДТС и принятых в моделируемом ТОАР, не превышают порядка величины. Причем сравнение полученных значений тепловых потоков проводилось для двух вариантов ТОАР, отличающихся количеством термосифонов: 1145 и 1519 ДТС соответственно. Большее число ДТС соответствует варианту компоновки теплообменника с учетом возможного отказа одного ТОАР из четырех.

Максимальные расчетные значения плотности радиального теплового потока для модели ординарного ДТС соответствуют максимальной тепловой нагрузке СПОТ при

вводе ее в действие (рис. 12) и составляют: для варианта компоновки термосифонных ТОАР с 1145 ДТС – 224 кВт/м<sup>2</sup>, с 1519 ДТС – 168 кВт/м<sup>2</sup>. Эти значения, соответственно, на 20 и 40 % ниже  $q_r^{\max}$ , достигнутой нами экспериментально [12] в зоне испарения ДТС на масштабном стенде (табл.). Такой запас с учетом умеренного консерватизма, заложенного в модель, позволяет гарантированно обеспечить теплоотвод СПОТ, превышающий уровень остаточных тепловыделений активной зоны ВВЭР-1000.

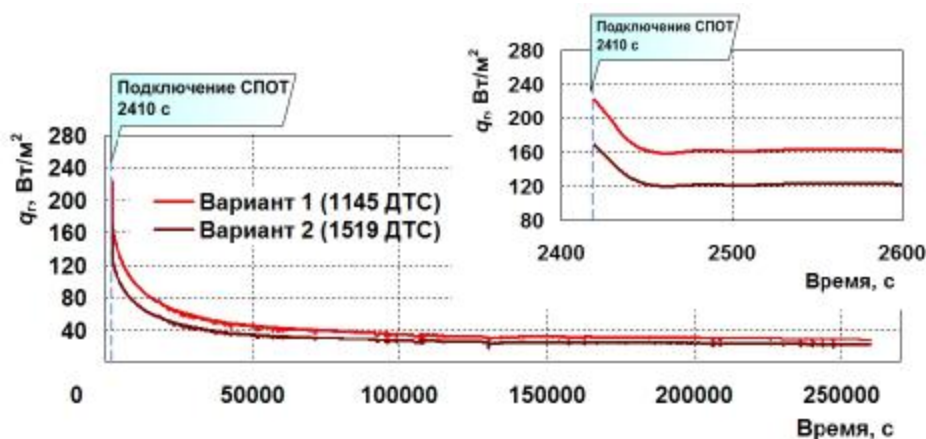


Рис. 12. Расчетные значения плотности радиального теплового потока в испарителях обычных ДТС

Т а б л и ц а

#### Характеристики обычных ДТС ТОАР СПОТ

Характеристики ДТС	Экспериментальная модель	Расчетная модель	
		Вариант 1	Вариант 2
Количество ДТС в ТОАР, $N_{\text{дтс}}$ , шт.	31	1145	1519
Длина зоны испарения, $H_{\text{и}}$ , м	0,5	1,5	
Длина зоны конденсации, $H_{\text{к}}$ , м	0,5	1,0	
Отношение диаметра к длине испарителя, $d_{\text{дтс}}^{\text{вн}}/l_{\text{дтс}}^{\text{и}}$	0,04	0,013	
Плотность теплового потока, радиальная, $q_r$ , кВт/м <sup>2</sup>	280	224	168
Плотность теплового потока, осевая, $q_l$ , кВт/м <sup>2</sup>	27000	66880	50412

#### Особенности эксплуатации термосифонного теплообменного оборудования

Так как в течение всего периода эксплуатации РУ СПОТ и СПР КД должны быть в постоянной эксплуатационной готовности, теплообменники этих систем постоянно находятся в режиме ожидания. Это состояние обеспечивается тем, что сборка обычных ДТС заправлена теплоносителем (заправка осуществляется еще при изготовлении теплообменников на производстве) и теплообменники подключены в петли расхолаживания РУ. Петля расхолаживания первого контура вместе с полостью ТОАР со стороны первого контура заполнены теплоносителем, и в них поддерживается давление первого контура. Главный запорный клапан СПОТ закрыт, система пассивного ввода в действие СПОТ заполнена рабочей средой (азот), и в ней поддерживается заданный уровень давления. В таком же состоянии находится и ТОА СПР. Промконтурь СПОТ и СПР КД заполнены промежуточным теплоносителем и отвакуумированы.

В условиях нормальной эксплуатации РУ термосифонные ТОАР СПОТ и ТОА СПР КД отключены от элементов РУ запорной арматурой. При аварийном обесточивании энергоблока ввод в действие СПОТ и СПР КД осуществляется пассивным образом по сигналу потери электропитания на катушке электромагнитного привода сбросного клапана, открывающего линию сброса запирающего давления на пневмосистеме главного запорного клапана СПОТ и СПР КД [3, 6]. В условиях функционирования СПОТ и СПР КД отвод теплоты от первого контура и КД осуществляется пассивным образом без какого-либо вмешательства со стороны оператора. Интенсивность отвода теплоты определяется только температурным напором между первым контуром и конечным поглотителем.

При использовании в качестве конечного поглотителя воды, размещаемой в баках аварийного отвода теплоты (БАОТ), функционирование СПОТ продолжается до полного испарения воды из БАОТ. По результатам расчетного моделирования этот период составляет не менее 3,5 суток. При использовании в качестве конечного поглотителя воздуха функционирование СПОТ продолжается до состояния, при котором будет оставаться температурный напор между первым контуром и атмосферным воздухом. Уровень остаточного тепловыделения активной зоны перестает быть определяющим для безопасности РУ.

Следует отметить особенность эксплуатации СПОТ в зимний период. В условиях низких температур окружающего воздуха при использовании в качестве конечного поглотителя воды, размещаемой в баках аварийного отвода теплоты (БАОТ), для предотвращения ее замерзания предусмотрен режим продувки термосифонного ТОАР теплоносителем первого контура с малым расходом. Продувку осуществляют за счет перепада давления на реакторе, создаваемого работой главных циркуляционных насосов. Постоянная циркуляция теплоносителя первого контура через термосифонный ТОАР осуществляет подогрев промконтура и теплообменника-конденсатора, установленного в БАОТ, обеспечивая тепловую защиту воды в БАОТ от замерзания [5]. Реализуемый таким образом способ тепловой защиты БАОТ также является пассивным, так как воду в баке подогревают без использования каких-либо отдельных источников теплоты и дополнительных насосов для греющего теплоносителя, а только используя циркуляцию нагретого теплоносителя первого контура РУ. Уровень тепловых потерь для подогрева воды БАОТ при этом составляет 0,01...0,03 % номинальной тепловой мощности РУ. Аналогичным образом предотвращается и замерзание теплоносителя промконтура в случае, если в качестве конечного поглотителя используется атмосферный воздух.

В условиях планового расхолаживания РУ перед перегрузкой топлива один из четырех каналов СПОТ может выводиться в ремонт. При проведении ремонтного обслуживания СПОТ и СПР КД проверяются состояние и работоспособность арматуры, герметичность промконтура, а также количество и состояние теплоносителя в промконтуре. При необходимости проводятся замена теплоносителя и восстановление проектного уровня вакуума в промконтуре.

Для проверки состояния внутренних полостей термосифонных теплообменников на их корпусах предусмотрены люки, через которые вводятся зонды эндоскопов для осмотра термосифонной сборки и сварных соединений. Для контроля плотности проводятся гидравлические испытания теплообменного оборудования в составе систем.

### **Выводы**

Теплообменное оборудование на основе ДТС позволяет создать СПОТ с дополнительными автономными промежуточными контурами теплопереноса между радиоактивным источником тепловыделений и охлаждающей средой, которая, помимо эффективного теплоотвода в аварийных ситуациях, обеспечивает экологическую безопас-

ность и надежную защиту персонала и населения от возможного распространения радиоактивных загрязнений.

СПОТ на основе ДТС имеют целый ряд существенных преимуществ: простоту конструкции, автономность в работе, надежность, высокую эффективную теплопроводность при сравнительно низком внутреннем термическом сопротивлении, минимальное внешнее гидравлическое сопротивление, компактность теплообменного оборудования, способность к трансформации тепловых потоков.

Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик термосифонного теплообменного оборудования показывает, что расчетные значения тепловых нагрузок термосифонных теплообменников, заложенные в модели СПОТ и СПР КД, существенно ниже величин, достигнутых на экспериментальном стенде. Располагаемый запас расчетных оценок в 20...40 % позволяет гарантированно обеспечить теплоотвод СПОТ, превышающий уровень остаточного тепловыделения активной зоны.

Полученные методом расчетного и экспериментального моделирования режимные характеристики автономной термосифонной СПОТ РУ с ВВЭР-1000 позволили выбрать основные конструктивные параметры ТОАР СПОТ и ТОА СПР КД и сформулировать рекомендации по их конструктивному оформлению и компоновке в составе систем.

Состояние отработавших более двадцати лет на экспериментальных стендах термосифонных теплообменников и сборок ДТС позволяет использовать предложенные нами рекомендации по конструкции и изготовлению термосифонного теплообменного оборудования, а также заправке ДТС теплоносителем.

## **ТЕРМОСИФОННИЙ ТЕПЛООБМІННИК СПВТ ПЕРШОГО КОНТУРУ ВВЕР-1000**

**І.І. Свириденко, А.К. Сухов, Д.В. Шевельов, А.В. Поляков**

Розглянуто теплообмінник на основі двофазних термосифонів автономної системи пасивного відводу залишкового тепловиділення реакторної установки АЕС з ВВЕР, що забезпечує відвід теплоти від першого контуру. Наведено особливості конструкції теплообмінника, його переваги, розглянута технологія виготовлення теплообмінника і заправки термосифонів проміжним теплоносієм. Представлено експериментальні і розрахункові характеристики термосифонного теплообмінника.

## **THERMOSIPHON BASED HEAT EXCHANGER OF WWER 1000 PRIMARY CIRCUIT PASSIVE RESIDUAL HEAT REMOVAL SYSTEM**

**I. Sviridenko, A. Sukhov, D. Shevielov, A. Polyakov**

The article presents an autonomous, thermosiphon based heat exchanger of the Primary circuit's passive residual heat removal system for NPP with WWER 1000 reactors. The heat exchanger's design features, its advantages, technology of its production and filling-in the thermosiphons with the intermediate coolant are described. Experimental and analytical characteristics of the heat exchanger are presented.

### **Список использованных источников**

1. *Свириденко И.И.* Пассивная система безопасности АЭС с ВВЭР на основе низкотемпературных двухфазных термосифонов / И.И. Свириденко, А.К. Сухов // Матер. Межд. конф. УкрЯО «Стратегия развития ядерной энергетики: Выбор Украины» / Под ред. акад. НАНУ Вишневого И.Н. и Трофименко А.П. – К., 2001. – С. 36 – 37.

2. *Свириденко И.И.* Совершенствование пассивных систем аварийного расхолаживания реакторной установки с отводом остаточных тепловыделений / И.И. Свириденко, А.В. Подопригора, А.Ю. Москаленко, С.Н. Ткач // Сб. науч. тр. СНИЯЭиП. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2002. – Вып. 6. – С. 48 – 57.

3. Пат. 81419 Україна, МПК<sup>8</sup> G 21 C 15/18. Пасивна система відведення залишкових тепловиділень / Свириденко І.І.; заявник і патентовласник СевНТУ. – № a200500392; заяв. 17.01.2005; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1.

4. Свириденко І.І. Оценка влияния схемы подключения автономной термосифонной СПОТ к реакторной установке на устойчивость отвода остаточных тепловыделений / И.И. Свириденко // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2006. – Вип. 3 (19). – С. 107 – 120.

5. Свириденко І.І. Способ тепловой защиты бака аварийного расхолаживания в условиях низких температур / И.И. Свириденко, В.А. Тимофеев, Д.В. Шевелев // Зб. наук. пр. СВМИ. – Севастополь: СВМИ, 2008. – Вып. 1 (14). – С. 125 - 129.

6. Свириденко І.І. Способ пассивного расхолаживания компенсатора давления / И.И. Свириденко // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2008. – Вып. 4 (28). – С. 56 – 62.

7. Исследования режимных характеристик систем пассивного отвода остаточных тепловыделений реакторных установок АЭС на основе расчетного и экспериментального моделирования («СПОТ»): отчет о НИР (заключит.) / рук. К.Ю. Федоровский; исполн. К.Ю. Федоровский [и др.]. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – 285 с. – № ГР 0109U001702.

8. Свириденко І.І. Влияние автономной СПОТ ВВЭР-1000 на переход аварии из запроектной в тяжелую стадию при малой течи из парового объема КД / И.И. Свириденко, Д.В. Шевелев // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009. – Вип. 3 (31). – С. 49 – 58.

9. Исследование и разработка высокоэффективных экобезопасных тепловых схем ядерных и тепловых энергоустановок («КОНТУР». Направление – атомная энергетика). Компонировка, схемы и режимы работы автономных пассивных систем аварийного расхолаживания ЯЭУ: отчет о НИР (заключит.) / рук. К.Ю. Федоровский; исполн. К.Ю. Федоровский [и др.]. – Севастополь: СевНТУ, 2005. – Т. 3. – 161 с. – № ГР 0103U001417; Инв. № 0205U007159.

10. Свириденко І.І. Влияние компоновки СПОТ на безопасность отвода остаточных тепловыделений при выбросе азота в первый контур / И.И. Свириденко, Д.В. Шевелев, А.В. Поляков // Тр. Одесск. политехн. ун-та. – Одесса: ОПУ, 2009. – Вып. 2 (32). – С. 59 – 63.

11. Свириденко І.І. Влияние пассивной части САОЗ на устойчивость автономной термосифонной СПОТ / И.И. Свириденко // Вісник СевНТУ. Сер. Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. – Севастополь: СевНТУ, 2010. – Вып. 106. – С. 132 – 136.

12. Свириденко І.І. Система аварийного расхолаживания ядерных энергетических установок на основе тепловых труб / И.И. Свириденко // Матер. 3-й Рос. нац. конф. по теплообмену, 21 - 25 окт. 2002 г. – М.: МЭИ. – Т. 1. – С. 182 – 185.

13. Безродный М.К. Исследование кризиса тепломассопереноса в низкотемпературных бесфитильных тепловых трубах / М.К. Безродный, Д.В. Алексеенко // Теплофизика высоких температур. - 1977. – 15. - № 4. – С. 370 – 376.

14. Толубинский В.И. Результаты экспериментального определения предельных тепловых потоков закрытых двухфазных термосифонов / В.И. Толубинский, И.Л. Пиоро // Пром. теплотехника. - 1983. – 5. - № 2. – С. 3 – 7.

15. Пиоро И.Л. Обобщение опытных данных по предельному тепломассопереносу в двухфазных термосифонах / И.Л. Пиоро // Пром. теплотехника. - 1985. – 7. - № 3. – С. 24 – 29.

16. Imura H. Critical heat flux in a closed two-phase thermosyphon / H. Imura, K. Sasa-guchi, H. Kosai // Int. J. of Heat and Mass Transfer. - 1983. – 26. - № 8. – P. 1181 – 1188.

17. Безродный М.К. Влияние давления промежуточного теплоносителя на критические тепловые потоки в испарительных термосифонах / М.К. Безродный, Д.В. Алексеенко // Изв. вузов. Энергетика. - 1977. – № 4. – С. 80 – 84.

18. Безродный М.К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика. - 2-е изд., доп. и пер. / М.К. Безродный, И.Л. Пиоро, Т.О. Костюк. – К.: Факт, 2005. – 704 с.