

3. Polak E. Computational Methods in Optimization. Ser. Math. Science and Engng, v. 77. New York: Academic Press, 1971. 332 p.
4. Емельянов И.Я., Назарян В.Г., Постников В.В. Оптимизация энергораспределения в активной зоне действующего энергетического реактора. — Атомная энергия, 1978, т. 44, вып. 4, с. 310—315.
5. Зуховицкий С.И., Авдеева Л.И. Линейное и выпуклое программирование. М.: Наука, 1967, с. 409—419.
6. Додонов А.Д., Петрунин В.П., Тяжкороб В.Н. и др. Научно-технические аспекты производства изотопов гражданского назначения в тяжеловодном реакторе Л-2. — В сб.: Усовершенствованные тяжеловодные реакторы. М., ИТЭФ, 1998, с. 87—92.

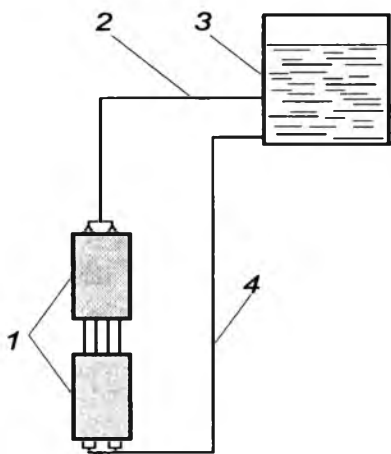
Поступила в Редакцию 28.02.03

УДК 621.039.58+532.5

СТРАТИФИЦИРОВАННЫЕ ОДНО- И ДВУХФАЗНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ И СИСТЕМАХ ТРУБА—ЕМКОСТЬ

Безлепкин В.В. (ФГУП «СПб АЭП»), Калякин С.Г., Опанасенко А.Н.,
Пометько Р.С., Селиванов Ю.Ф. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейтунского)

Для повышения безопасности АЭС нового поколения разрабатываются и реализуются новые технические решения. К ним относится, например, наличие защитной оболочки, препятствующей выходу радионуклидов за пределы АЭС при возможной аварии. Значительному росту температуры оболочки при аварии должно препятствовать наличие теплообмена между защитной оболочкой и окружающей средой. Для дополнительного повышения запаса эффективности защитной оболочки предусматриваются специальные системы отвода тепла. Один из вариантов системы аварийного отвода тепла представлен в упрощенном виде на рис. 1.



Р и с. 1. Принципиальная схема одной петли технологических каналов системы аварийного отвода тепла: 1 — охладители; 2 — сбросной трубопровод; 3 — бак аварийного отвода тепла; 4 — подводящий трубопровод

На металлической защитной оболочке АЭС размещаются в два яруса охладители. Они подключаются к баку аварийного отвода тепла, образуя, таким образом, независимые каналы системы отвода тепла из герметичного объема реакторного отделения. В целом такая система способна отвести от защитной оболочки тепло, выделяющееся при аварии. Охладители по вертикали соединяются с помощью четырех перепускных трубопроводов Ду 125 мм. Нижний коллектор (Ду 200 мм) каждого технологического канала посредством трубопроводов подключается к нижней части соответствующего бака аварийного отвода тепла. Верхние охладители посредством трубопроводов соединены со средней частью соответствующего бака аварийного отвода тепла, из которого организован выхлоп в атмосферу через гидрозатвор.

Для проверки работоспособности данной системы в ФЭИ изготовлена крупномасштабная мо-

дель и исследованы некоторые режимы работы. Модель представляет собой прямоточную установку, включающую следующие элементы: смеситель, фрагмент защитной оболочки, сбросной трубопровод и бак аварийного отвода тепла высотой 6,5, диаметром 2,2 м. Объем бака примерно соответствует приходящейся на один охладитель доле объема натурального. Геометрические условия входа и слива теплоносителя соответствуют натурным. Сбросной трубопровод выполнен из трубы внутренним диаметром 150 мм. Фрагмент защитной оболочки представляет собой плиту высотой 4, шириной 2 м. Толщина материала защитной оболочки, высота и толщина поперечных ребер также соответствуют натурным. Стенка защитной оболочки обогревается насыщенным паром. Отвод тепла от защитной оболочки обеспечивается одно- или двухфазным теплоносителем, подготовленным в смесителе. Источником пара и воды служат системы ТЭЦ ФЭИ.

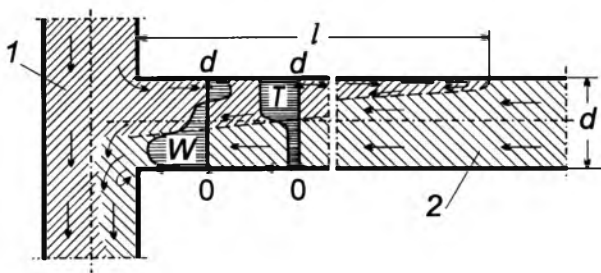
В ходе опытов было выявлено, что при достижении некоторых параметров в контуре отвода тепла от защитной оболочки возникают вибрации и гидроудары, препятствующие поступлению теплоносителя в бак аварийного отвода тепла и вызывающие опасения за целостность оборудования установки. Аналогичные процессы и явления возможны и в других системах безопасности АЭС при прямых контактах недогретой до температуры насыщения воды и пара. Особенности процессов в таких системах связаны с низким давлением, низкой массовой скоростью и большим диаметром трубопроводов. Необходимость анализа таких процессов и явлений вытекает из актуальности вопросов, связанных с работоспособностью систем безопасности установок.

В работе рассматриваются особенности течения сред с разной плотностью, когда под действием гравитационного поля становится возможным разделение потока на слои с разной температурой или разными фазами. Различие температуры в потоке жидкости, возникающее за счет подвода тепла, смешения потоков с разной температурой и других причин, может приводить к стратифицированным течениям. Главной их особенностью является совместное наличие потоков жидкости с разной температурой при относительно слабом перемешивании [1, 2].

Применительно к работе системы аварийного отвода тепла стратификация и смешение теплоносителя являются актуальными по следующей причине. В определенных условиях в трубопроводах системы возможно одновременное существование недогретой до температуры насыщения воды, воды при температуре насыщения и насыщенного пара. При контакте пара с недогретой водой возможно появление гидроударных явлений, причиной которых в сбросном трубопроводе может быть проникновение недогретой воды из бака аварийного отвода тепла на расстояние, обеспечивающее возможность формирования на поверхности раздела жидкость—пар перекрывающих все сечение трубы волн с захватом некоторого объема пара с последующей его конденсацией. Такая длина может составлять примерно 5—10 диаметров, что для трубы диаметром 150 мм соответствует 1 м.

Экспериментальные исследования структуры движения теплоносителя, полей и пульсаций температуры при температурном расслоении позволили выявить два существенно разных режима поступления теплоносителя из циркуляционного трубопровода в бак с жидкостью: без образования и с образованием возвратного течения в трубопроводе. Эти режимы определяются, в первую очередь, соотношением гравитационных сил при различии температуры и динамических напоров движущей

щегося потока. Картина наблюдаемых в экспериментах характерных течений для случая поступления по трубопроводу холодной жидкости в емкость с горячей жидкостью при относительно небольшой скорости движения жидкости по горизонтальному трубопроводу приведена на рис. 2.



Р и с. 2. Структура движения теплоносителя, характерное распределение температуры и скорости в трубопроводе при $Fr \leq 2,3$; 1, 2 — горячий и холодный теплоноситель соответственно

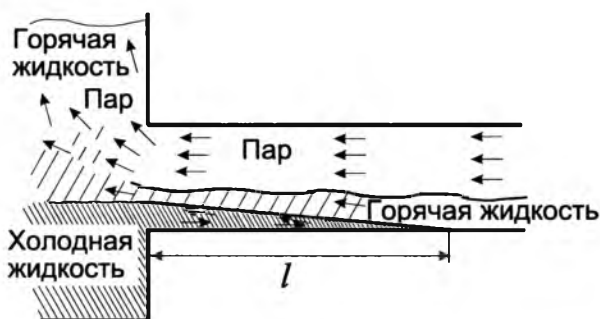
В верхней части трубопровода существует протяженный клин с циркуляцией теплой жидкости. При наличии в емкости холодной, в трубопроводе горячей жидкости клин с встречным течением возникает в нижней части трубы. По результатам опытов длина клина l может быть определена по соотношению

$$l/d = 0,012 Re^{0,5} Fr^{-1,5}, \quad (1)$$

где d — диаметр трубопровода; $Re = wd/\nu$; $Fr = \rho w^2 / g \Delta \rho d$; w — скорость теплоносителя в трубе в зоне отсутствия клина; ν — кинематическая вязкость теплоносителя; ρ — плотность теплоносителя, поступающего по трубе в емкость; $\Delta \rho$ — разность плотностей теплоносителя в емкости и трубе. Опыты с трубой диаметром 45 и 75 мм показали, что формирование клина жидкости наблюдается при числе $Fr \leq 2,3$.

С помощью зависимости (1) были проведены расчетные оценки условий проникновения жидкости из бака аварийного отвода тепла в трубопровод, по которому в бак поступает горячий теплоноситель от охлаждающих коробов. В связи с тем, что высота уровня жидкости над входом сбросного трубопровода составляет около 4 м, температура жидкости в трубопроводе принималась равной 110°C , т.е. температуре насыщения при давлении около 0,14 МПа. Температура жидкости в баке и расход теплоносителя по контуру принимались близкими к реальным.

При появлении в трубе относительно небольшого расхода пара он может двигаться вдоль верхней образующей трубы, ниже находится слой горячей воды. В этих условиях вдоль нижней кромки трубы можно ожидать появления клина холодной жидкости, проникающей из бака в трубу.



Р и с. 3. Качественный характер течений в системе труба—емкость для двухфазного потока

Качественная картина течений в таком случае представлена на рис. 3, результаты расчетных оценок течения одно- и двухфазных потоков с помощью зависимости (1) приведены в табл. 1, 2. Отметим, что в расчетных оценках для двухфазного потока использована гомогенная модель.

Таблица 1. Результаты расчета истечения однофазного теплоносителя температурой 110 °С из трубы диаметром 150 мм в емкость с более низкой температурой

Температура в емкости, °С	Расход теплоносителя, т/ч							
	5		10		15		20	
	Число Fr	Длина клина, м	Число Fr	Длина клина, м	Число Fr	Длина клина, м	Число Fr	Длина клина, м
40	0,13	7,84	0,52	1,37	1,17	0,50	2,08	0,24
60	0,18	4,62	0,74	0,82	1,67	0,30	2,96	Fr > 2,3
80	0,32	2,02	1,28	0,36	2,90	Fr > 2,3	5,14	Fr > 2,3

Таблица 2. Результаты расчета истечения двухфазного потока из трубы диаметром 150 мм в емкость с водой при температуре насыщения (110 °С)

Паросодержание	Расход теплоносителя, т/ч							
	5		10		15		20	
	Число Fr	Длина клина, м	Число Fr	Длина клина, м	Число Fr	Длина клина, м	Число Fr	Длина клина, м
0,05	0,02	129,34	0,08	22,86	0,19	8,30	0,34	4,04
0,10	0,08	23,66	0,33	4,18	0,74	1,52	1,31	0,74
0,15	0,18	8,68	0,73	1,54	1,64	0,56	2,92	Fr > 2,3
0,20	0,32	4,25	1,29	0,75	2,91	Fr > 2,3	5,17	Fr > 2,3

Как видно из результатов расчета, в достаточно широкой области рабочих параметров установки возможно поступление недогретой воды из емкости в трубопровод с двухфазным потоком. Возможность таких явлений подтверждается опытными данными в ходе исследований на крупномасштабной модели системы аварийного отвода тепла. На рис. 4 приведены показания термопар, расположенных в поперечном сечении сбросного трубопровода на расстоянии 1 м от входа в бак аварийного отвода тепла. Данный режим характеризуется постепенным повышением мощности, передаваемой к контуру охлаждения. Начиная с некоторого момента времени, появляются пульсации температуры, минимальная температура приближается к температуре жидкости в баке аварийного отвода тепла. Это можно объяснить поступлением в трубу недогретой жидкости из бака. Тем самым подтверждается возможность проникновения теплоносителя из емкости в трубу и как следствие возможность возникновения в ней конденсационных гидроударных явлений.

Фактически рассмотрена одна из причин возникновения гидродинамической неустойчивости: проникновение недогретой жидкости из емкостей в трубопроводы с пароводяной смесью. Это становится возможным в широкой по параметрам про-

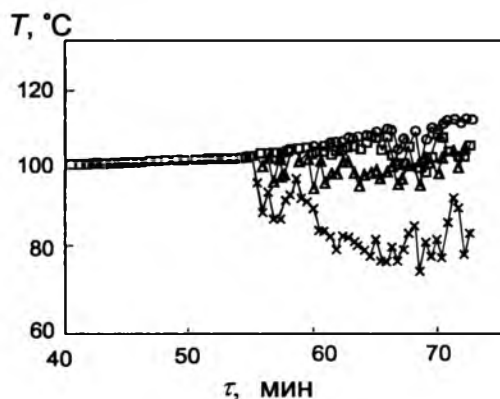
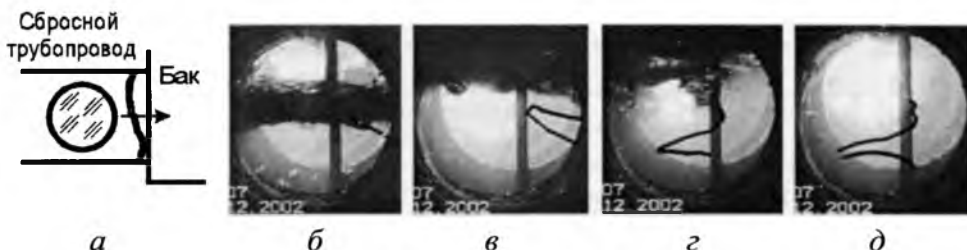


Рис. 4. Изменение температуры теплоносителя в поперечном сечении сбросного трубопровода при увеличении снимаемой мощности в случае расположения термопары по центру трубы (○), на расстоянии 20 (□), 40 (△), 70 мм (×) вниз от центра

ектной области работы систем аварийного отвода тепла и связано с относительно низкими динамическими напорами потока, большим диаметром трубопроводов и другими факторами. Наряду с указанной причиной в подобных системах большое влияние на их работу могут оказывать процессы генерации пара и характер течений в элементах защитной оболочки. Наличие поперечных ребер с отверстиями может способствовать неустойчивости течения паровой и жидкой фаз в сбросном трубопроводе. Подтверждением таких процессов могут быть результаты видеосъемки на выходном участке сбросного трубопровода в двухфазной области. На рис. 5 направление течения теплоносителя определяется по расположению тонких нитей, прикрепленных к вертикальному стержню.



Р и с. 5. Изменение направления течения двухфазного потока в выходном сечении сбросного трубопровода: а — расположение канала при видеосъемке; б — устойчивый двухфазный поток с разделным течением фаз в сторону бака аварийного отвода тепла (вправо); в — повышение уровня жидкости; г — изменение направления течения; д — продолжение течения в обратную сторону, все сечение занято жидкостью из бака аварийного отвода тепла

Сложность процессов тепломассообмена в подобных системах, их актуальность в обеспечении безопасности АЭС требуют дополнительных исследований в слабоизученной области режимных и геометрических параметров: трубы большого диаметра, низкое давление, низкая массовая скорость, стратифицированные течения, нерегулярные конденсационные процессы в трубах и больших объемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монин А.С. Теоретические основы геофизической гидродинамики. Л.: Гидрометеиздат, 1988.
2. Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н. Турбулентные течения при воздействии объемных сил и неавтомоделности. М.: Машиностроение, 1975.

УДК 539.22.621.039.548.343

ДИФФУЗИЯ УГЛЕРОДА В УРАНЕ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В ВАКУУМЕ

Орлов В.К., Сергеев В.С., Фомишкин М.А., Ростовцев А.А.
(ФГУП ВНИИНМ им. А.А. Бочвара), Круглов А.К. (ЦНИИатоминформ)

Элементный и фазовый состав поверхности урана после термовакuumной обработки. Исследования урана и сплавов на его основе после различных режимов термообработки в вакууме показали высокое содержание углерода на поверхности исследуемых образцов. Методами оже-спектроскопии и вторичной ионной эмиссии