

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.039

ОПАСНОСТЬ ГИДРОУДАРА В КОНТУРАХ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Столяревский А.Я. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Для контуров циркуляции жидкого теплоносителя серьезная опасность разрушения создается возможностью возникновения гидроударов. Именно это явление, в частности, возникло при аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США) [1, 2].

Теоретически это явление обосновал П.Е. Жуковский в 1898 г. и объяснил его инерцией массы жидкости, движущейся по трубопроводу. Приобретенная в процессе циркуляции жидкостью кинетическая энергия при изменении параметров течения и, в частности, при внезапном закрытии задвижки расходуется на деформацию трубопровода и жидкости

$$0,5\pi\gamma_0^2/c^2g^{-2} = \pi r_0^3/p^2\delta^{-1}E_2^{-1} + 0,5\pi r_0^2/p^2E_1^{-2},$$

где γ — удельный вес жидкости; $p = \rho cl$ — давление жидкости в момент гидроудара; c — скорость движения жидкости в трубе; ρ — плотность жидкости ($\rho = \gamma/g$); l, r — длина и внутренний радиус трубопровода соответственно; δ — толщина стенки трубопровода; E_1, E_2 — модули упругости жидкости и материала стенок трубопровода соответственно,

откуда

$$p = \rho cl, \quad (1)$$

λ — скорость распространения ударной волны;

$$\lambda = \left(\sqrt{(2r_0\delta^{-1}E_2^{-1} + E_1^{-1})g^{-1}\gamma} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Как видно из формулы (1), давление гидроудара зависит от плотности жидкости и скорости ее циркуляции и в отдельных системах может быть значительным.

С этой точки зрения в ядерной энергетике особое внимание привлекает тяжелый жидкометаллический теплоноситель, предлагаемый для использования в быстром реакторе БРЕСТ.

Приведем результаты расчета давления гидроудара в реакторной установке БРЕСТ-300 со свинцовым теплоносителем. Рассматривалась однопетлевая расчетная модель без учета местных гидравлических сопротивлений (коллекторов, колен и др.), что оправдано при выявлении масштабов проявления физических процессов. По этой же причине не анализировали и сценарии прохождения конкретных аварий и инициирующих их исходных событий. Плотность свинца принималась равной $11,3 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости 42 ГПа , скорость теплоносителя $1,8 \text{ м/с}$, толщина стенки трубопровода $0,03 \text{ м}$, внутренний радиус $0,8 \text{ м}$, модуль упругости материала стенки (сталь типа 20ХГСА) 210 ГПа [3—5].

По сравнению с водяным теплоносителем при равной скорости теплоносителя кинетическая энергия потока в реакторе БРЕСТ увеличивается более чем в 10 раз, что приводит к большей разрушительной силе гидроудара, который в этом случае правильно называть «свинцовым» (lead hammer), а не «водным молотом» (water hammer), как он именуется в литературе.

Риск возникновения гидроудара в реакторе БРЕСТ определяется вероятностью резкого перекрытия проходного сечения для свинцового теплоносителя на любом участке первого контура. Гидроудар может возникать по пассивному механизму [6] и при активных воздействиях на элементы контура. Одним из наиболее опасных исходных событий с этой точки зрения может стать внезапный останов главного циркуляционного насоса. Исходя из достигнутой надежности оборудования этого типа в рекомендациях (см., например, WASH-1400) вероятность отказа такого оборудования при работе (failure to run) составляет $1 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$, т.е. примерно один внезапный останов в 15 лет. Статистика для АЭС США с PWR показывает, что за 11 лет происходят даже такие на первый взгляд невероятные события, как разрушение вала ГЦН [1].

Расчет по зависимости (2) показал, что возникающая при подобном гидроударе ударная волна имеет скорость 180 м/с , давление ударной волны по формуле (1) равно $3,7 \text{ МПа}$.

При таких характеристиках гидроудара, пренебрегая некоторым амортизирующим влиянием верхнего газового объема, расчетная ударная сила на верхнюю крышку реактора составит 7400 т, что определяется большой площадью крышки ($\sim 20 \text{ м}^2$). Как показал опыт аварии на Чернобыльской АЭС, без принятия специальных конструктивных мер по предотвращению разрушения ограждающих первый контур конструкций при тяжелых авариях последствия от воздействия гидроудара могут быть катастрофическими.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по ядерной энерготехнологии. Пер. с англ. под ред. В.А. Легасова. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. TMI-2 Compilation of Data Concerning Known and Suspected Water Hammer Events in Nuclear Power Plants. May 1982, NUREG-CR-2059.
3. Физические величины. Справ. под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Zhukov A.V., Sorokin A.P., Smirnov V.P., Papandin M.V. Heat transfer in lead cooled fast reactor. — In: Proc. of ARS'94 Intern. Meeting on Advanced Reactor Safety. Pittsburgh, USA, Apr. 17—21, 1994, № 1, p. 66—69.
5. Husaini S., Arastu A., Safwat H. Riyad quashu, analysis of passive water hammer. — In: Proc. of 1999 ASME Intern. Mechanical Engineering Congress. Nashville, USA, Nov. 14, 1999.

Поступило в Редакцию 29.10.01

УДК 621.039.713+66.074.7+546.15

УЛАВЛИВАНИЕ ^{129}I ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Ровный С.И., Пятин Н.П., Истомин И.А. (ФГУП «ПО «Маяк»)

Необходимость эффективного и надежного улавливания ^{129}I при переработке отработавшего ядерного топлива связана прежде всего с неблагоприятной совокупностью его свойств, таких, как длительный период полураспада ($1,57 \cdot 10^7$ лет), многообразие химических форм, сорбируемость на поверхностях трубопроводов и оборудования, высокая подвижность в биосфере и др., что в конечном итоге может привести к загрязнению окружающей среды.

В ядерном топливе ВВЭП-440, поступающем на переработку, содержится в среднем $0,23 \text{ кг } ^{129}\text{I}$ на 1 т урана. При мощности завода 200 т/год на операции резки—растворения отработавшего топлива выделяется $\sim 50 \text{ кг } ^{129}\text{I}$ активностью $\sim 280 \text{ ГБк/год}$ ($\sim 7,5 \text{ Ки/год}$) [1].

В настоящее время общепринятой концепцией обращения является максимальная отдувка ^{129}I в голове процесса, извлечение из газового потока с последующей надежной изоляцией от биосферы. В этой связи во всех странах, развивающих ядерную энергетику и сопутствующую ей переработку отработавшего ядерного топлива, проводятся как лабораторные, так и промышленные проверки методов и систем его улавливания на основе жидких поглотителей и твердых сорбентов [2]. При этом изучается возможность улавливания как молекулярного иода, так и его органических форм.

Aбсорбция радиоактивного иода жидкими поглотителями находит применение, как правило, в качестве предварительной системы очистки при переработке отработавшего топлива. Общими недостатками всех жидкостных методов являются образование большого количества жидких радиоактивных отходов и сложность аппаратного оформления процесса. В качестве твердых сорбентов для улавливания иода применяются ловушки, содержащие нитрат серебра, цеолиты в Ag-форме, активированный уголь и другие поглотители. Из сравнительного анализа двух методов следует, что твердые сорбенты наиболее приемлемы для улавливания иода из газовой фазы. Особенно это относится к неорганическим сорбентам, импрегнированным азотно-кислым серебром. При этом суммарную реакцию процесса сорбции можно представить в виде



Эта реакция обратима, и в присутствии избытка оксидов азота может происходить выделение в газовую фазу сорбированного иода. Для исключения протекания обратной реакции сорбцию необходимо проводить в диапазоне $170\text{—}200^\circ\text{C}$, но не превышая температуру плавления азотно-кислого серебра 212°C .

На заводе РТ-1 для улавливания ^{129}I при переработке отработавшего топлива был применен сорбент на основе оксида алюминия марки А (ГОСТ 8136-76), пропитанного солью азотно-кислого серебра. При выборе исходили из того, что он обладает высокой эффективностью улавливания ^{129}I ($\eta > 99,9\%$). Прочная