

PHÂN TÍCH THỦY NHIỆT CÁC QUÁ TRÌNH CHUYỂN TIẾP TRONG BÌNH ĐIỀU ÁP LÒ VVER-1000 BẰNG CHƯƠNG TRÌNH RELAP/SCDAPSIM

LÊ THỊ THU, LÊ ĐẠI DIỄN

*Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân
179 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội
Email: le_thu_151@yahoo.com*

Tóm tắt: Bình điều áp sử dụng trong lò nước áp lực là một trong những thành phần chính của hệ thống tải nhiệt lò phản ứng. Bình điều áp có chức năng duy trì và kiểm soát áp suất của hệ thống trong giới hạn cho phép. Áp suất của bình điều áp thay đổi do sự sinh ra bọt khí trong quá trình nóng lên của chất tải nhiệt và sự ngưng tụ hơi trong quá trình nước được phun vào bình điều áp.

Bài báo này mô phỏng bình điều áp lò VVER-1000 bằng phần mềm RELAP/SCDAPSIM và phân tích hoạt động thủy nhiệt diễn ra trong bình điều áp với các kịch bản khác nhau như là: trạng thái dừng, trạng thái chuyển tiếp tăng áp suất, trạng thái chuyển tiếp tăng mức nước và trạng thái chuyển tiếp giảm áp suất.

Từ khóa: RELAP/SCDAPSIM, VVER-1000, bình điều áp.

I. MỞ ĐẦU

Các lò phản ứng nước áp lực (PWR) được thiết kế và vận hành theo nguyên lý hai vòng tuần hoàn. Nước tải nhiệt trong vòng sơ cấp thực hiện chu trình làm mát và do đó lấy nhiệt từ vùng hoạt của lò phản ứng để thực hiện trao đổi nhiệt với nước trong hệ thống tuần hoàn thứ cấp tại thiết bị sinh hơi. Nước trong hệ thống thứ cấp sau khi nhận nhiệt sẽ sôi và chuyển thành hơi và chuyển sang hệ thống tuốc bin-máy phát, sau đó hơi được ngưng tụ và quay trở lại bình sinh hơi. Bình điều áp sử dụng trong lò phản ứng nước áp lực (PWR) với mục đích điều khiển áp suất của vòng sơ cấp. Một bình điều áp gồm có một thùng chịu áp hình trụ bằng thép dụng thẳng đứng được đỡ ở dưới đáy, chứa nước ở phần không gian phía dưới và chứa hơi ở phần không gian phía trên. Bình điều áp thực hiện chức năng bằng cách duy trì điều kiện bão hòa bên trong bình điều áp. Để bù lại cho sự thay đổi áp suất và nhiệt độ trong suốt quá trình biến đổi của chất tải nhiệt (nóng lên và lạnh đi) bình điều áp được trang bị bộ gia nhiệt trong trường hợp áp suất trong bình điều áp giảm và các van phun, van an toàn để xả hơi ra khỏi bình điều áp trong trường hợp quá áp xảy ra. Hình 1 mô tả sơ đồ nguyên lý của bình điều áp.

Các quá trình cơ bản liên quan đến việc duy trì và đảm bảo áp suất vận hành của lò phản ứng theo thiết kế bao gồm các hiện tượng chủ yếu gắn với các thành phần thiết bị trong bình điều áp.

1. Bộ gia nhiệt : Mục đích của bộ gia nhiệt là hạn chế việc giảm áp không mong muốn bằng việc đun nóng phần nước trong bình điều áp. Áp suất trong bình điều áp tăng cùng với việc nhiệt độ và thể tích nước cũng tăng lên. Cơ chế truyền nhiệt trong quá trình này là cơ chế dẫn nhiệt, đối lưu và có thể có sôi màng cục bộ do nhiệt độ gần với bề mặt bộ gia nhiệt cao hơn nhiệt độ bão hòa trong toàn bộ hệ thống. Bộ gia nhiệt còn được kích hoạt trong quá trình khởi động lò phản ứng từ trạng thái lạnh lên trạng thái nóng.

2. Van phun nước : Van phun nước được lắp đặt phía trên đỉnh của bình điều áp nhằm hạn chế sự tăng áp không mong muốn có thể xảy ra. Hai hiện tượng cơ bản xảy ra trong bình

điều áp là sự ngưng tụ do tiếp xúc trực tiếp giữa nước phun vào và sự đốt nóng nước phun vào do truyền nhiệt trực tiếp từ thành của bình điều áp. Nhiệt độ của nước phun vào tăng và nhanh chóng đạt nhiệt độ bão hòa.

3. Sự dâng áp : Sự giãn nở của chất tải nhiệt làm tăng mức nước trong bình điều áp. Hiện tượng truyền nhiệt trong quá trình chuyển tiếp với sự tăng áp là sự ngưng tụ và đối lưu tự nhiên xảy ra tại thành của bình điều áp, sự pha trộn hay phân tầng của nước nóng và lạnh ở phần đáy của bình và sự ngưng tụ tại bề mặt tiếp giáp giữa hai pha.

4. Sự giảm áp : Hiện tượng cơ bản xảy ra trong bình điều áp khi giảm áp là sự giãn nở hơi, biến hơi nhanh và sôi trên thành bình. Khi mức nước trong bình điều áp giảm do giảm áp của nước trong hệ thống tải nhiệt sơ cấp, thể tích hơi giãn nở và do đó áp suất hơi cũng giảm. Theo sau sự giảm áp, nhiệt độ bão hòa giảm và nước trở thành quá nhiệt và có thể xảy ra sự hóa hơi nhanh chóng. Sự hóa hơi nhanh của nước giúp duy trì áp suất và làm chậm lại quá trình giảm áp trong bình điều áp. Sự sôi trên thành của bình điều áp xảy ra do nhiệt độ thành cao hơn nhiệt độ bão hòa bên trong bình. Đối lưu cưỡng bức xảy ra tại phần dưới của thành bình trong quá trình giảm áp dưới bão hòa khi vùng nước nóng đi tới thành bình được làm mát trước đó bởi nước dưới bão hòa và quá trình này giúp làm giảm hiện tượng hóa hơi nhanh.

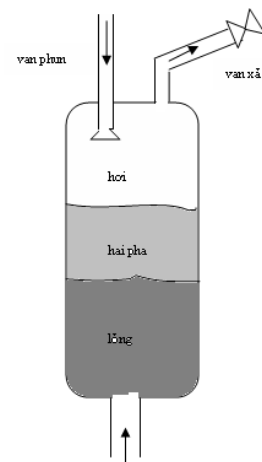
Lò phản ứng VVER của Nga thiết kế có nguyên lý hoạt động hoàn toàn tương tự như các lò PWR phương Tây. Thiết kế tiêu chuẩn VVER-1000/V320 là thiết kế lò phản ứng công suất 1000MW(e) và hiện đang được vận hành tại một số nhà máy điện hạt nhân tại LB Nga, CH Sec, Bungary. Trong những năm gần đây, thiết kế của lò VVER-1000 đã được cải tiến và hoàn thiện thông qua các dự án lò VVER-1000/V392 được xây dựng và vận hành tại trung Quốc, Ấn Độ và Iran. Ngoài ra, thiết kế mới nhất VVER-1200 hay AES-2006 với công suất được nâng cao hơn đã và đang được xây dựng tại các nhà máy điện hạt nhân Leningrad II và Novovoronezh II.

Việc nghiên cứu, tìm hiểu các quá trình chuyển tiếp trong bình điều áp giúp cho việc hiểu biết sâu sắc hơn về các quá trình, hiện tượng thủy nhiệt cơ bản xảy ra trong các chuyển tiếp xảy ra trong hệ thống tải nhiệt sơ cấp của lò PWR. Thông qua việc mô tả, áp dụng một số kịch bản chuyển tiếp cơ bản với các mô hình bình điều áp lò VVER-1000/V320, mô hình nút hóa bình điều áp và một số kết quả phân tích bằng chương trình RELAP/SCDAPSIM được thực hiện trong báo cáo này.

II. DỮ LIỆU VÀ MÔ HÌNH CỦA BÌNH ĐIỀU ÁP Lò VVER-1000

Sơ đồ nguyên lý cho mô hình bình điều áp có một số những đặc điểm cần chú ý như sau:

- Có 3 miền: Thể tích của thùng chịu áp được chia làm 3 miền theo điều kiện pha và mức năng lượng. Miền 1 là miền hơi và khí không ngưng tụ. Miền 2 là miền chất lỏng bão hòa chứa các bọt khí. Miền 3 là phần nước đi vào từ đường dâng được nối với một chân nóng của hệ thống tải nhiệt lò phản ứng.
- Cả 3 miền ở điều kiện cân bằng động.
- Chú ý tới mức nước thực tế và mức nước bị xẹp lại.
- Chú ý tới các hiện tượng thủy nhiệt diễn ra trong bình điều áp.



Hình 1: Sơ đồ nguyên lý của bình điều áp

Ngoài các hiện tượng thủy nhiệt diễn ra trong bình điều áp như đã nêu trên, dựa trên sơ đồ nguyên lý cũng như thực tế vận hành, cần phải lưu ý đến các vấn đề liên quan bao gồm:

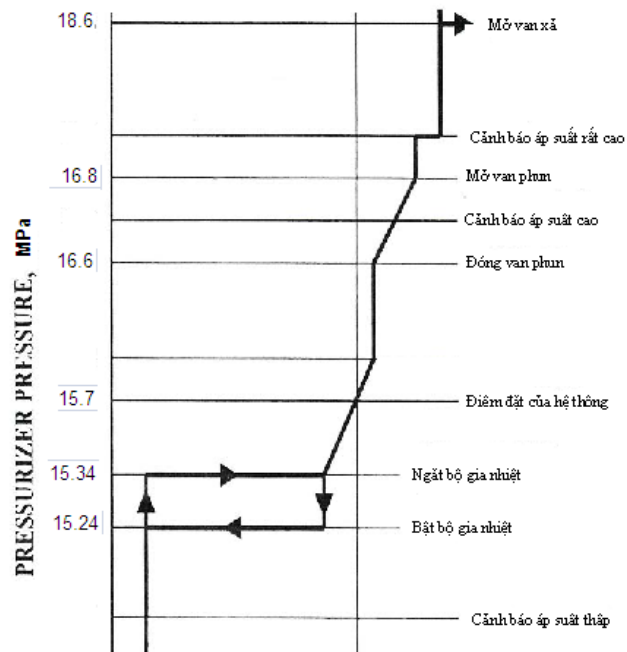
- Mô hình ngưng tụ hơi khí van phun hoạt động.
- Sự sinh bọt khí. Trong quá trình giảm áp, nước ở trạng thái dưới bão hòa và hơi ở trạng thái quá nhiệt sẽ đạt dần tới trạng thái bão hòa. Các bọt khí được sinh ra trong quá trình giảm áp ở miền 2.
- Ảnh hưởng của Boron. Trong miền chất lỏng có chứa Boron, điều này làm cho nhiệt độ sôi của chất lỏng tăng lên. Vì vậy cần chú ý tới sự ảnh hưởng của Boron.
- Sự ngưng tụ và sự sôi chất lưu ở trên thành bình điều áp.
- Sự truyền nhiệt lượng và khối lượng giữa pha lỏng và pha khí. Sự truyền nhiệt giữa miền 2 và miền 3 được thực hiện bởi phương thức dẫn nhiệt và đối lưu. Trong suốt quá trình tăng mức nước trong bình điều áp thì phần nước dâng lên sẽ hòa trộn vào phần nước có trong thùng chịu áp, phương thức truyền nhiệt đối lưu chiếm ưu thế.
- Ảnh hưởng của khí không ngưng tụ. Ở miền 1 có thể có khí không ngưng tụ (nitrogen). Sự truyền nhiệt lượng và khối lượng giữa các miền và thành bình điều áp sẽ chịu ảnh hưởng của khí không ngưng tụ.

Đường dâng của bình điều áp sử dụng trong lò VVER-1000 được nối với một chân nóng của hệ thống tải nhiệt lò phản ứng và van phun được nối với một chân nguội của hệ thống tải nhiệt lò phản ứng. Các thông số chính của bình điều áp lò VVER-1000/V320 được mô tả trong bảng số liệu sau đây [1], [5].

Bảng 1. Các thông số chính của bình điều áp lò VVER-1000/V320

| Thông số | V320 |
|--|-------|
| Thể tích tổng của thùng chịu áp (m ³) | 79 |
| Thể tích phần chứa nước ở điều kiện vận hành (m ³) | 55 |
| Mức nước ở điều kiện vận hành dừng (m) | 8.77 |
| Chiều cao của thùng chịu áp (m) | 12.7 |
| Độ cao tính tới đáy của thùng chịu áp (m) | 22.03 |
| Đường kính trong của thùng chịu áp (m) | 3.0 |
| Đường kính ngoài của thùng chịu áp (m) | 3.33 |
| Số lượng bộ đốt trong bộ gia nhiệt | 28 |
| Công suất tổng của bộ gia nhiệt (kW) | 2520 |
| Nhiệt độ vận hành (°C) | 346 |
| Áp suất thiết kế (MPa) | 17.7 |
| Áp suất vận hành (MPa) | 15.7 |
| Số lượng van xả an toàn | 3 |
| Tốc độ dòng khối qua một van xả an toàn, kg/s | 50 |
| Đường dâng áp | 18 |
| - Dài (m) | 0.346 |
| - Đường kính bên trong (m) | 0.426 |
| - Đường kính bên ngoài (m) | 1.69 |
| - Tổng thể tích (m ³) | |

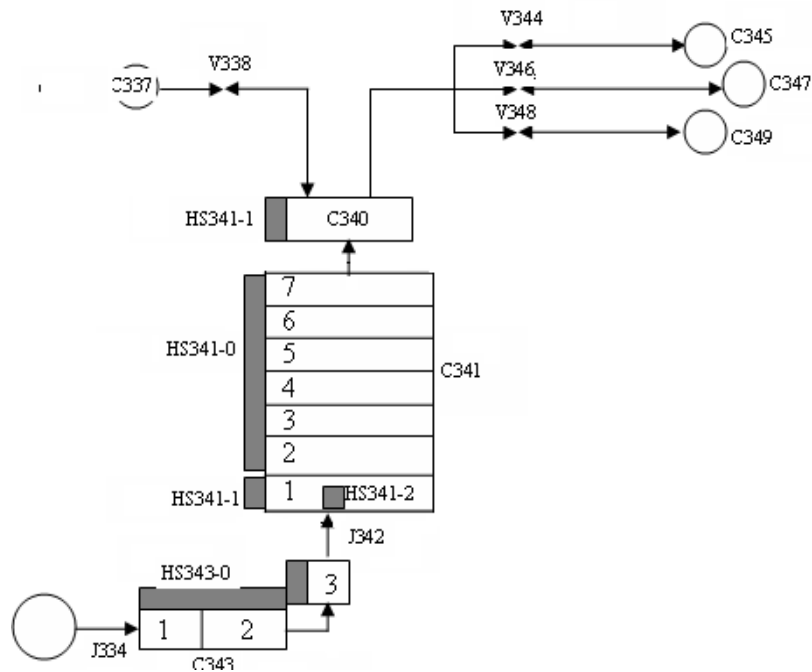
Sơ đồ sau đây mô tả các điểm đặt của các van và bộ gia nhiệt:



Sơ đồ 1: Sơ đồ kiểm soát áp suất của bình điều áp lò VVER1000

III. SƠ ĐỒ NODE HÓA BÌNH ĐIỀU ÁP

Sơ đồ node hóa của bình điều áp lò VVER-1000 được mô tả trong hình 2 như sau:



Hình 2: Sơ đồ node hóa bình điều áp

Các thành phần thủy lực được mô phỏng trong chương trình RELAP/SCDAPSIM: đường dâng là thành phần thủy lực C343 chia làm 3 thể tích kiểm soát (CV), thùng chịu áp được mô phỏng bởi hai thành phần thủy lực C341 và C340, các van xả an toàn được mô phỏng bởi 3 van (V344, V346, V348) và van phun được mô phỏng bởi van (V338).

Các cấu trúc nhiệt của thành ống đường dâng, thành của thùng chịu áp và bộ gia nhiệt được mô tả bởi các cấu trúc nhiệt tương ứng là HS1343-0, HS1341-0, HS1341-1 và HS1341-2 như được chỉ ra trong hình 2. Quá trình xây dựng input file sẽ sử dụng số liệu của bình điều áp lò VVER-1000/V320.

IV. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

1. Trạng thái dừng

Trạng thái dừng được mô phỏng tương ứng với trạng thái vận hành dừng tại 100% công suất lò phản ứng. Kết quả sau khi chạy chương trình bằng phần mềm RELAP/SCDAPSIM được so sánh với giá trị vận hành thực tế của lò VVER-1000/V320 trong bảng số liệu sau:

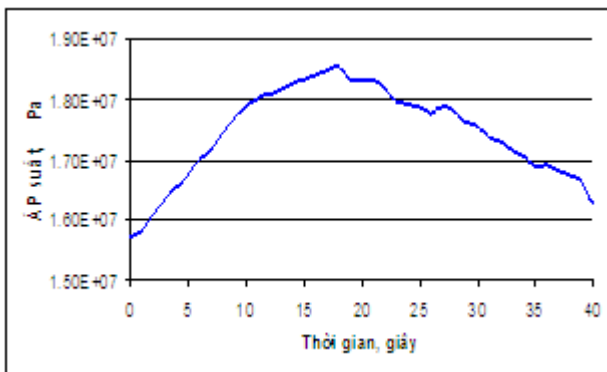
Bảng 2: Kết quả ở trạng thái dừng

| Thông số | Giá trị tính toán | Giá trị thiết kế | Sai số |
|--|-------------------|------------------|---------|
| Áp suất hơi tại đỉnh bình điều áp, MPa | 15.686 | 15.7 | 0.0016% |
| Nhiệt độ của nước, K | 618.99 | 619.0 | 0.09% |
| Mức nước, m | 8.325 | 8.77 | 5.07% |
| Trạng thái các van an toàn | Đóng | - | - |
| Trạng thái van phun | Đóng | - | - |
| Trạng thái bộ gia nhiệt | Ngắt | - | - |

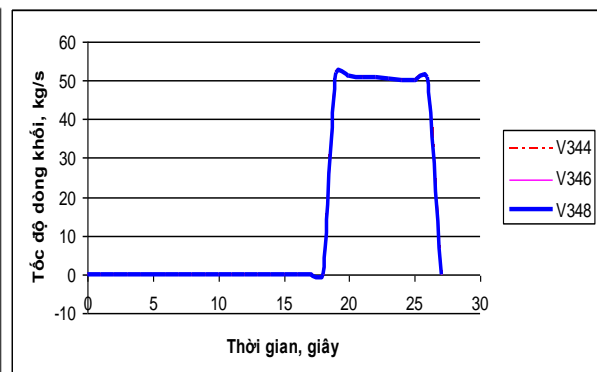
Với giá trị ghi trong bảng 2: sai số trong kết quả tính được khi chạy chương trình ở trạng thái dừng so với giá trị vận hành là nhỏ. Điều này cho thấy quá trình mô phỏng bình điều áp bằng phần mềm RELAP/SCDAPSIM là khá chính xác, kết quả này là chấp nhận được.

2. Chuyển tiếp tăng áp suất

Điều kiện ban đầu cho quá trình chuyển tiếp là áp suất tại đỉnh bình điều áp là 15.7 MPa. Hiện tượng tăng áp trong hệ thống tải nhiệt sơ cấp có thể xảy ra trong quá trình khởi động hay trong các tình huống sự cố, ví dụ như sự cố mất nước cấp trong bình sinh hơi (TLFW) kết hợp với việc không dập được lò phản ứng (ATWS). Khi đó, áp suất trong bình điều áp tăng dần tới điểm đặt số 1 của các xả an toàn (18.6 MPa). Điều này dẫn đến các van xả an toàn mở. Sau khi các van xả an toàn mở thì áp suất trong bình điều áp giảm dần. Áp suất bình điều áp giảm tới điểm đặt số 2 của các van xả an toàn (17.7 MPa), điều này dẫn tới sự đóng lại của các xả an toàn.



Hình 3: Áp suất tại đỉnh bình điều áp



Hình 4: Tốc độ dòng khối qua các van xả an toàn

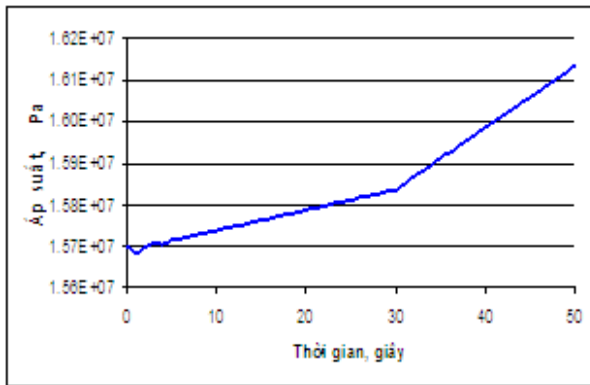
Tốc độ dòng khối lượng qua van xả an toàn có giá trị xấp xỉ 50 kg/s (hình 4). Giá trị này tương ứng với giá trị thiết kế của các van xả an toàn.

Hiện tượng thủy nhiệt chiếm ưu thế diễn ra trong bình điều áp khi áp suất tăng lên là hiện tượng ngưng tụ hơi trên thành của thùng chịu áp. Khi áp suất tăng dẫn đến nhiệt độ bão hòa của hơi tăng. Như vậy nhiệt độ trên thành của thùng chịu áp sẽ nhỏ hơn nhiệt độ bão hòa, dẫn đến hiện tượng ngưng tụ hơi trên thành của thùng chịu áp. Ngược lại, khi áp suất trong bình điều áp giảm, nhiệt độ sôi của nước giảm. Như vậy nhiệt độ trên thùng chịu áp lớn hơn nhiệt độ sôi của nước, dẫn đến hiện tượng sôi trên thành của thùng chịu áp.

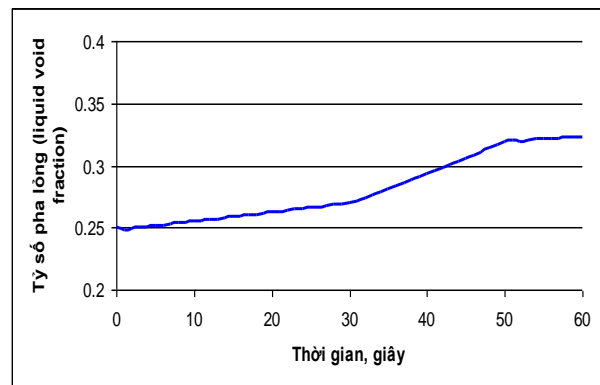
3. Chuyển tiếp tăng mức nước

Điều kiện đầu của quá trình chuyển tiếp là áp suất tại bình điều áp là 15.7 MPa và mức nước là 8.325 m (tương ứng với hệ số pha lỏng tại CV01 đến CV05 của thành phần C341 là bằng 1.0 và hệ số pha lỏng tại CV06 là bằng 0.25). Áp suất trong bình điều áp được tăng dần lên dẫn đến nước được dâng lên trong bình điều áp.

Quá trình nước lạnh dâng lên trong bình điều áp (hay quá trình áp suất tăng) dẫn đến hiện tượng ngưng tụ hơi trên thành của thùng chịu áp. Hình 6 mô tả sự tăng hệ số pha lỏng tại CV06, tương ứng với mức nước trong bình điều áp tăng lên.



Hình 5: Áp suất tại đỉnh bình điều áp



Hình 6: Tỷ số pha lỏng tại C34106

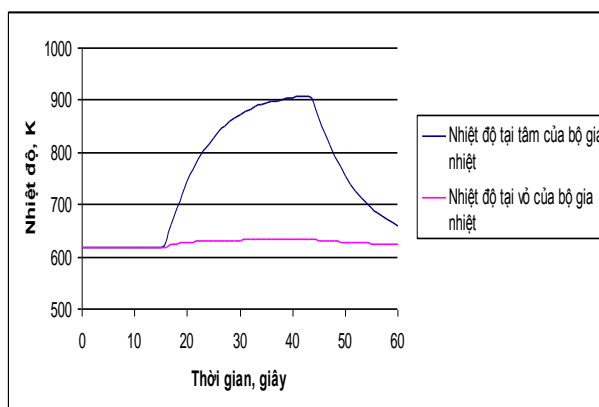
4. Chuyển tiếp giảm áp suất

Điều kiện ban đầu cho quá trình chuyển tiếp là áp suất tại đỉnh bình điều áp là 15.7 Mpa. Với một lý do chuyển tiếp bất thường nào đó diễn ra dẫn đến áp suất trong bình điều áp giảm tới giá trị điểm đặt 15.23 Mpa. Với giá trị áp suất này bộ gia nhiệt tự động bật lên. Nước trong bình điều áp được đốt nóng và làm sôi nước. Sự sinh ra của các bọt khí làm cho áp suất trong bình điều áp tăng lên. Khi áp suất tăng và đạt giá trị 15.34 thì bộ gia nhiệt sẽ tự động ngắt.

Diễn biến sự kiện sau khi chạy chương trình: đến giây thứ 15 thì áp suất tại đỉnh bình điều áp giảm tới giá trị 15.2 Mpa, tương ứng với sự hoạt động của bộ gia nhiệt. Sau khi bộ gia nhiệt hoạt động thì áp suất của bình điều áp được tăng dần lên. Tới giây thứ 45 thì đạt giá trị 15.34, tương ứng bộ gia nhiệt ngắt. Diễn biến sự thay đổi áp suất tại đỉnh bình điều áp và nhiệt độ của bộ gia nhiệt được biểu diễn trong hình 7 và hình 8.



Hình 7: Áp suất tại đỉnh bình điều áp



Hình 8: Nhiệt độ tại tâm và vỏ của bộ gia nhiệt

V. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày các hiện tượng thủy nhiệt cơ bản xảy ra trong các quá trình chuyển tiếp khi vận hành lò nước áp lực PWR nói chung và lò VVER-1000 nói riêng. Sử dụng số liệu bình điều áp lò VVER-1000/V320 để mô phỏng các kịch bản hoạt động của bình điều áp: Trạng thái dừng, trạng thái chuyển tiếp tăng áp suất, trạng thái chuyển tiếp tăng mức nước, trạng thái chuyển tiếp giảm áp suất. Diễn biến của các kịch bản được mô tả bởi các hình vẽ từ hình 3 tới hình 8.

Các kết quả tính toán, phân tích không chỉ giúp cho việc hiểu biết các quá trình cơ bản xảy ra trong bình điều áp, mà còn góp phần vào việc làm rõ và phân tích một cách đúng đắn các quá trình chuyển tiếp cũng như các phân tích sự cố nhà máy điện hạt nhân sử dụng lò VVER-1000 bằng chương trình RELAP/SCDAPSIM.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] The dynamic modeling of the pressurizer surge tank transients in light water reactor nuclear power plants. R.Zarghami, F.Jalali, N.Mostoufi, R.Sotudeh, K.Sepanloo, F.Dastjerdi and Ahmari. Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 29, No. B5. Printed in The Islamic Republic of Iran, 2005.
- [2] RELAP5/MOD 3.3 code manual, volume II: Appendix A input requirements. Nuclear Safety Analysis Division. Information systems laboratories, Inc.Rockvill, Maryland Idaho Falls, Idaho. December 2001.
- [3] RELAP5/MOD 3.3 code manual, volume V: User's guidelines. Nuclear Safety Analysis Division. Information systems laboratories, Inc.Rockvill, Maryland Idaho Falls, Idaho. December 2001.
- [4] Pressurized Water Reactor Systems, Reactor concept manual. USNRC Technical Training Center.
- [5] VVER-1000 Coolant Transient Benchmark. Nuclear energy agency organization for economic co-operation and development. OECD NSC2002-06.
- [6] Training course "Introduction to NPP Technology", Reactor Coolant System and Connected Systems. Risk Engineering Ltd. Sofia, Jan 2012

THERMAL-HYDRAULIC ANALYSIS OF TRANSIENTS IN PRESSURIZER OF REACTOR VVER-1000 USING RELAP/SCDAPSIM CODE

LE THI THU and LE DAI DIEN

*Institute for Nuclear Science and Technology
179 Hoang Quoc Viet, Nghia Do, Cau Giay, Ha Noi
Email: le_thu_151@yahoo.com*

Abstract: The pressurizer is one of the main components in reactor coolant system (RCS) of PWR and VVER designs. The pressurizer's function is control and maintenance of the RCS pressure within the limit values. The pressurizer pressure is changed by the increase in bubble through heating or steam condensation through water sprays.

The paper presents about modeling of pressurizer of VVER-1000 by RELAP/SCDAPSIM and analysis of the transient behavior. The transient scenarios were modeled and analyzed, such as: the steady state, the pressure increase, the water level increase and the pressure decrease.

Key words: RELAP/SCDAPSIM, VVER-1000, pressurizer.