

排放载荷分析方法合理性论证及关键影响因素研究

吴 丹^{1,2} 王 杰^{1,2} 杜思佳^{1,2} 方红宇^{1,2} 喻 娜^{1,2}

1(中国核动力研究设计院 成都 610041)

2(核反应堆系统设计技术重点实验室 成都 610041)

摘要 在自主化三代核电厂的设计中,为了满足超压保护功能,一般会使用较为先进的先导式安全阀。先导式安全阀较以前 M310 电厂的阀门,具有开启时间更短等特点。三代核电厂的稳压器安全阀如果在某些情况下开启,其上游水封将会对下游排放管道造成非常大的冲击力。因此,排放载荷分析是先进的三代电厂的稳压器排放管线设计中的一个关键性技术,只有掌握了排放载荷分析方法,才能为应力计算提供可靠参考,进而对管线设计、管道支撑布置的合理性进行论证。使用 RELAP5 程序进行热工水力计算,对输出信息进行合理的处理可获得载荷计算结果。本文将对该分析方法的合理性进行验证,并且在此基础上,选取对载荷影响非常关键的因素,包括:阀门开启时间、水封温度、水封体积等进行研究,为载荷优化提供合理性建议。

关键词 排放载荷, 阀门开启时间, 水封温度, 水封体积

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.040007

Validation of the discharge force analysis method and key influence factors study

WU Dan^{1,2} WANG Jie^{1,2} DU Sijia^{1,2} FANG Hongyu^{1,2} YU Na^{1,2}

1(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

2(Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Chengdu 610041, China)

Abstract [Background] Pilot operated safety valve is widely used in the design of generation-III nuclear power plant (NPP) to provide overpressure protection function. Compared with safety valves used in generation-II nuclear power plant, pilot operated safety valve has much shorter opening time, hence generates great discharge force. Discharge force analysis is crucial to the design of pressurizer discharge pipe of the 3rd generation advanced nuclear power plant. As a necessary input for stress analysis, discharge force is important for evaluating whether the pipe design and pipe support design is reasonable. [Purpose] This study aims to develop and validate a set of discharge force analysis method for 3rd generation NPP. [Methods] Based on the previous study of basic discharge force analysis method where the RELAP5 was used to model the thermal-hydraulic process and the force results deduced through post-processing, further validation of the proposed discharge force analysis method was processed by simulating the EPRI PWR Safety and Relief Valve Test in this study. Key influencing factors, such as valve opening time, seal temperature, seal volume, *et al*, were investigated to give useful suggestions for design. [Results] It is

新型燃料元件 LOCA 条件下复杂行为及安全特性研究(No.U1867219)资助

第一作者: 吴丹, 女, 1986 年出生, 2013 年于清华大学获博士学位, 研究领域为反应堆热工水力与安全分析

通信作者: 杜思佳, E-mail: dusj02@163.com

收稿日期: 2020-02-15, 修回日期: 2020-03-30

Supported by Complex Behavior and Safety Characteristics of New Fuel Element under LOCA Condition (No.U1867219)

First author: WU Dan, female, born in 1986, graduated from Tsinghua University with a doctoral degree in 2013, focusing on thermal hydraulic and safety analysis

Corresponding author: DU Sijia, E-mail: dusj02@163.com

Received date: 2020-02-15, revised date: 2020-03-30

found that valve opening time, seal temperature, and seal volume has a great influence on the calculation results, and the law of influence is very complicated. [Conclusions] It is proved that the RELAP5 code could be used to model the complex discharge process, and the method developed can be applied to engineering practice.

Key words Discharge force, Valve opening time, Seal temperature, Seal volume

水封排放过程是一个涉及复杂两相流动,且热工水力参量变化非常剧烈的瞬态过程。由于水封上下游压差高达一百多倍(水封上游压力为十几兆帕,水封下游压力为一个大气压),因此水封以极高的速度和加速度通过下游排放管线,从而对排放管线造成巨大的瞬时冲击力。在先进的三代电厂的稳压器排放管线设计中,排放载荷分析将成为一个关键性的技术问题。排放载荷分析的目的是为了得到排放管线载荷时程曲线,以此作为应力分析的基本输入之一,进而论证管线布置、管道支撑设计是否满足相关要求。

国际上载荷分析相关的实验研究、分析方法研究相对较少,并且目前也没有一个公认可靠的分析工具能够完成从热工水力分析到载荷分析整个过程的计算。国内在以往的电厂(二代和二代加电厂)设计中,稳压器排放管线设计与国外电厂差异不大,因此没有专门对排放载荷分析技术进行研究。在目前的三代电厂设计中(如:华龙一号),由于涉及很多设计改进与优化,排放管线设计以及管线上游的边界初始条件,如:阀门开启时间、水封体积和温度等都与以往二代加电厂有很大差异,因此必须掌握排放载荷分析流程和方法,并且针对三代电厂的设计特点,计算排放载荷,为后续应力分析提供可靠输入。

在之前的研究中,介绍了一种排放载荷分析方法^[1],即:使用RELAP5程序进行热工水力分析,通过对RELAP5程序计算结果中的有效信息进行力学处理,进而获得每个管道的载荷时程曲线。本文将对该方法的合理性进行论证,并且针对影响载荷大小的关键因素,如:阀门开启时间、水封温度、水封体积等进行研究,为载荷优化提供合理性建议。

1 排放载荷分析方法合理性论证

1.1 排放载荷分析方法简介

在之前的研究中^[1],推荐使用RELAP5程序分析排放载荷的热工水力过程,这是由于RELAP5程序是经过充分验证、能够用于两相热工水力过程分析的,且建模相对简单。两相排放过程涉及到临界流、各种流型变化、相间阻力和相间换热过程,对于这些物理现象,程序均具备合理的模型来对其进行模拟,例如:程序包含Henry-Fauske模型用以模

拟临界流、程序具有合理的竖直流型图和水平流型图,能够模拟泡状流、弹状流、环状流之间的流型转变过程以及不同流型条件下的相间传热传质过程^[2-4]。因此,拟通过使用RELAP5程序进行热工水力分析,获得排放过程的有效信息即可供力学处理的输入信息包括:管道内的空泡份额、汽液相流速、汽液相密度、压力等。

热工水力分析后,对管道每个控制节块的相关结果按照文献[1]进行处理,即可获得管道所受的排放载荷时程曲线(图1给出了控制单元基本几何、流动及力学参量信息)。图2给出了本文所建立的排放载荷分析方法流程图。

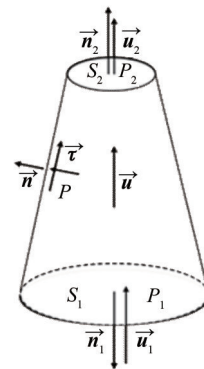


图1 控制单元示意图

Fig.1 Systematic diagram of the control cell

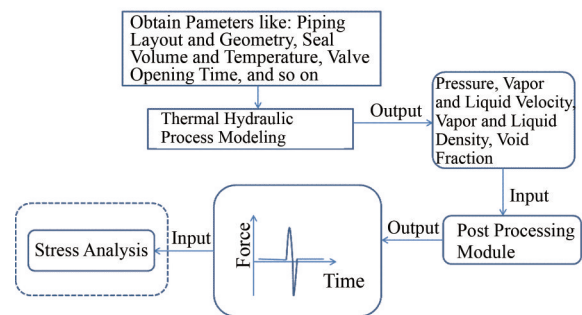


图2 排放载荷分析流程图

Fig.2 Flow chart of discharge force analysis method

图1中 S_1 、 S_2 分别表示入口、出口截面积; P_1 、 P_2 、 P 分别表示入口、出口截面处以及控制体侧面压力; $\vec{u}_1$ 、 $\vec{u}_2$ 、 $\vec{u}$ 分别表示控制体入口、出口流速以及控制体内平均流速; $\vec{n}_1$ 、 $\vec{n}_2$ 、 $\vec{n}$ 分别表示入口截面法向方向、

出口截面法向方向、控制体侧面法向方向； $\vec{\tau}$ 表示切向作用力。

$$\begin{aligned} \vec{F}_l' = & \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^n [\alpha_i \vec{u}_{gi} \rho_{gi} + (1 - \alpha_i) \vec{u}_{li} \rho_{li}] dV_i + \\ & [\alpha_1 \rho_{g1} u_{g1}^2 + (1 - \alpha_1) \rho_{l1} u_{l1}^2] \vec{n}_1 S_1 + \\ & [\alpha_2 \rho_{g2} u_{g2}^2 + (1 - \alpha_2) \rho_{l2} u_{l2}^2] \vec{n}_2 S_2 + \\ & P_1 \vec{n}_1 S_1 + P_2 \vec{n}_2 S_2 + \\ & \sum_{i=1}^n [\alpha_i \rho_{gi} + (1 - \alpha_i) \rho_{li}] g \vec{k} dV_i \end{aligned} \quad (1)$$

式中： α_i 、 α_1 、 α_2 分别表示第*i*个控制体空泡份额、管道入口节块空泡份额、管道出口节块空泡份额； u_{gi} 、 u_{g1} 、 u_{g2} 分别表示第*i*个控制体汽相流速、管道入口汽相流速、管道出口汽相流速； u_{li} 、 u_{l1} 、 u_{l2} 分别表示第*i*个控制体液相流速、管道入口液相流速、管道出口液相流速； ρ_{gi} 、 ρ_{g1} 、 ρ_{g2} 分别表示第*i*个控制体汽相密度、管道入口节块汽相密度、管道出口节块汽相密度； ρ_{li} 、 ρ_{l1} 、 ρ_{l2} 分别表示第*i*个控制体液相密度、管道入口节块液相密度、管道出口节块液相密度。

1.2 排放载荷分析方法合理性论证

由于RELAP5程序并不是为了解决排放载荷求解问题而开发，因此对于本分析方法必须进行合理性论证，才能进行应用。

Stubbe等^[5]在之前的研究中，使用RELAP5/MOD3/5M5程序模拟排放载荷热工水力进程，使用TROPIC程序处理RELAP5程序计算结果，并且通过和EPRI PWR Safety and Relief Valve Test实验结果进行对比，验证模拟方法的合理性。他们的验证

结果显示，使用该分析方法能够大体模拟排放过程管道热工水力参数的变化形式以及排放载荷时程曲线，但模拟结果和实验结果还有较大差异，例如：某些测点压力峰值较实验结果偏小30%左右，某些管道载荷峰值较实验结果偏小47%左右。

本文选取EPRI PWR Safety and Relief Valve Test实验(TEST 917)作为模拟对象^[5-6]，验证所建立的排放载荷分析方法的合理性。图3给出了EPRI/CE实验装置图，在图3中，TANK1模拟稳压器，TANK2中充满饱和蒸汽。

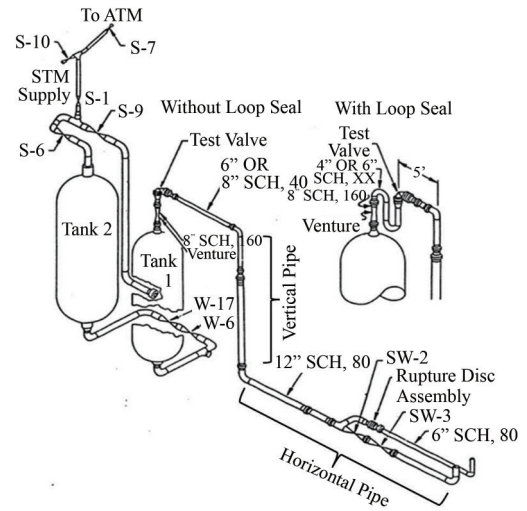


图3 EPRI/CE实验装置图^[5]

Fig.3 Diagram of the EPRI/CE experiment facility^[5]

图4给出了阀门流量和排放管线竖直段出口压力的计算结果和实验结果的对比。从图4可以看出，RELAP5程序能够较好地模拟水封排放这一剧烈变化的热工水力过程。

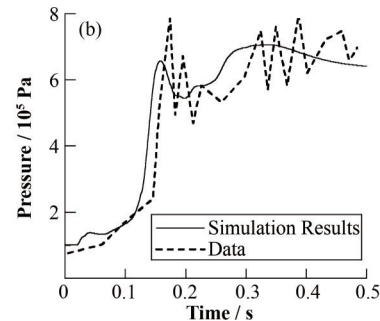
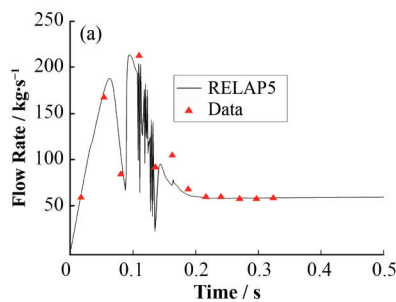


图4 阀门流量(a)和竖直段出口压力(b)的计算结果与实验结果对比

Fig.4 Comparison between the calculation results and the experimental results of valve flow rate (a), outlet pressure of the vertical section (b)

图5给出了竖直段及水平段载荷峰值计算结果与实验结果的对比。表1给出了载荷分析结果定量比较。对于竖直线段，载荷峰值大小与实验结果的偏差均在20%以内；对于水平管段，第一个载荷峰值出现的时间和大小与实验结果符合较好，第二个载荷峰值较实验结果偏小25.3%。由于该瞬态涉及

复杂的两相流动换热过程，而表1中反映载荷相关计算结果的误差均在30%以内，在进行实际的应力分析时，出于保守考虑，通常将计算的载荷峰值放大两倍作为输入，因此本文所建立的分析方法的计算误差是可以接受的，通过和实验结果对比显示方法是合理可信的，满足工程应用的需求。

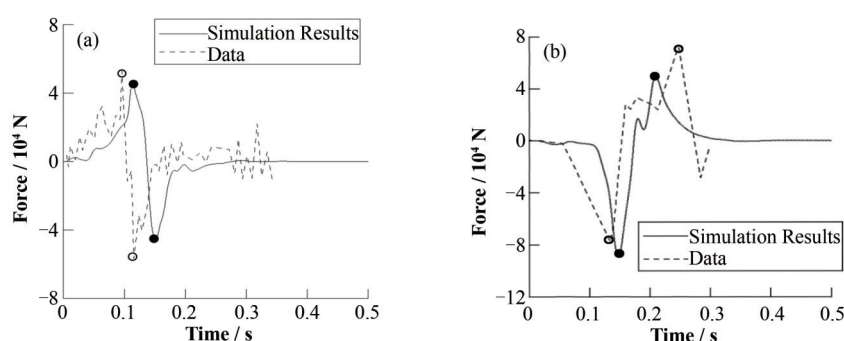


图5 竖直接管段(a)和水平管段(b)的载荷计算结果与实验结果比较

Fig.5 Comparison between the calculation results and the experimental force results of vertical section (a) and horizontal section (b)

表1 载荷分析结果定量
Table 1 Discharge force comparison results

实验结果 Experimental results				RELAP5 模拟结果 Analysis results using RELAP5				偏差 Deviation	
竖直接管段 Vertical pipe	第一个峰值 The first peak	出现时刻 Time	0.096 s	第一个峰值 The first peak	出现时刻 Time	0.113 s	第一个峰值 The first peak	出现时刻 Time	0.017 s
		大小 Value	52 671 N		大小 Value	46 825 N	第一个峰值 The first peak	大小 Value	11.1%
	第二个峰值 The second peak	出现时刻 Time	0.115 s	第二个峰值 The second peak	出现时刻 Time	0.151 s	第二个峰值 The second peak	出现时刻 Time	0.036 s
		大小 Value	-56 672 N		大小 Value	-46 016 N	第二个峰值 The second peak	大小 Value	18.8%
	两个峰值 Two peaks	时间间隔 Time interval	0.019 s	两个峰值 Two peaks	时间间隔 Time interval	0.038 s	—		
水平管段 Horizontal pipe	第一个峰值 The first peak	出现时刻 Time	0.135 s	第一个峰值 The first peak	出现时刻 Time	0.147 s	第一个峰值 The first peak	出现时刻 Time	0.012 s
		大小 Value	77 892 N		大小 Value	89 092 N	第一个峰值 The first peak	大小 Value	14.3%
	第二个峰值 The second peak	出现时刻 Time	0.248 s	第二个峰值 The second peak	出现时刻 Time	0.209 s	第二个峰值 The second peak	出现时刻 Time	0.039 s
		大小 Value	66 478 N		大小 Value	49 644 N	第二个峰值 The second peak	大小 Value	25.3%
	两个峰值 Two peaks	时间间隔 Time interval	0.113 s	两个峰值 Two peaks	时间间隔 Time interval	0.062 s	—		

2 排放载荷关键影响因素研究

影响排放载荷大小的关键因素主要包括阀门开启时间、水封温度、水封体积、管线布置等。由于管线布置受空间限制、上游设计影响较大,因此这里仅对阀门开启时间、水封温度、水封体积进行敏感性分析。假设排放过程在EPRI/CE这个实验装置上进行,设定基准工况的参数为:阀门开启时间0.5 s,水封温度50℃,水封体积 $33.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。

为了研究阀门开启时间对载荷影响,假设水封温度、水封体积设定与基准工况相同。改变阀门开启时间,计算当开启时间分别为0.1 s、0.3 s、0.5 s、0.7 s、0.9 s时的载荷结果,如表2所示。从表2可以看出,阀门开启时间对载荷峰值的影响很大,尤其是当阀门开启时间从0.9 s减小至0.3 s时,载荷峰值增大了十几倍,这主要是由于水封通过阀门都是以临

界流速通过,阀门开启时间变小,则单位时间阀门开启面积变大,通过阀门的液体质量变大,因此对管道冲击力变大。从表2还可以看出,当阀门开启时间从0.3 s变为0.1 s时,虽然载荷峰值有所增大,但增大幅度较小,这是由于当阀门开启时间为0.3 s时,下游管道内的流体速度已接近临界流,由于管道接管处的临界流限制,使得即使阀门开启速度更快,下游流体的流速增加幅度也有限,因此载荷峰值增大幅度有限。

为了研究水封温度对载荷的影响,假设阀门开启时间、水封体积设定与基准工况相同。改变水封温度,计算当水封温度分别为30℃、50℃、70℃、90℃、110℃(下游管线初始压力对应的饱和温度为100℃)时的载荷结果,如表3所示。从表3可以看出,当水封温度相对下游压力为过冷水时,温度变化对载荷影响无明显规律可循,这主要是因为水封温

度降低会导致水封密度增大,但水封密度增大又导致质量增大、加速度减小,因此两个竞争效应存在,不能直接得出其与载荷大小的关系。但是,当水封温度超过阀门下游初始压力对应的饱和温度时,载荷峰值大大降低,这是由于水封运动至阀门下游管道时会急剧汽化,形成密度低很多的蒸汽,这样对降低对下游管道的载荷。

表2 阀门开启时间敏感性分析结果

Table 2 Sensitivity of valve opening time analysis results

阀门开启时间 Valve opening time / s	竖直管段载荷峰值 (取绝对值) Force peak value of the vertical pipe (absolute value) / N	水平管段载荷峰值 (取绝对值) Force peak value of the horizontal pipe (absolute value) / N
0.1	595 839	589 139
0.3	545 186	552 167
0.5	244 543	281 868
0.7	76 752	142 929
0.9	35 918	82 437

表3 水封温度敏感性分析结果

Table 3 Sensitivity of seal temperature analysis results

水封温度 Seal temperature / °C	竖直管段载荷峰值 (取绝对值) Force peak value of the vertical pipe (absolute value) / N	水平管段载荷峰值 (取绝对值) Force peak value of the horizontal pipe (absolute value) / N
30	343 944	370 074
50	244 543	281 868
70	273 883	293 845
90	268 948	295 567
110	130 253	166 073

为了研究水封体积对载荷的影响,假设阀门开启时间、水封温度设定与基准工况相同。改变水封体积,计算当水封体积分别为 $11.1\times10^{-3}\text{ m}^3$ 、 $22.2\times10^{-3}\text{ m}^3$ 、 $33.3\times10^{-3}\text{ m}^3$ 、 $44.4\times10^{-3}\text{ m}^3$ 、 $55.5\times10^{-3}\text{ m}^3$ 时的载荷结果,如表4所示。从表4可以看出,当水封体积从 $33.3\times10^{-3}\text{ m}^3$ 变大至 $55.5\times10^{-3}\text{ m}^3$ 时,载荷峰值增大了很多,这是由于水封质量变大,从阀门刚开启至开至满开度,阀门一直有液体通过,当液体质量增大,下游管道载荷变大;对于水封体积从 $33.3\times10^{-3}\text{ m}^3$ 变小至 $11.1\times10^{-3}\text{ m}^3$ 时,载荷峰值大小变化无明显规律可循,这是由于此时水封体积较小,在阀门开启至满开度之前,水封已经完全通过阀门,虽然水封体积大会使得水封质量较大,从而增大对下游管道的载荷;但当水封质量增大时,上下游压差驱使的水封加速度变小使得对下游管道载荷减小,两个竞争效应存在使得难以确定水封体积对载荷大小的影响规

律。总的来说,和水封温度影响规律相似,水封体积对载荷大小影响规律较为复杂,从设计的角度来看,水封体积设计不宜过大。

表4 水封体积敏感性分析结果

Table 4 Sensitivity of seal volume analysis results

水封体积 Seal volume / m^3	竖直管段载荷峰值 (取绝对值) Force peak value of the vertical pipe (absolute value) / N	水平管段载荷峰值 (取绝对值) Force peak value of the horizontal pipe (absolute value) / N
11.1×10^{-3}	249 909	260 001
22.2×10^{-3}	187 466	215 333
33.3×10^{-3}	273 883	293 845
44.4×10^{-3}	470 518	498 303
55.5×10^{-3}	633 348	617 245

3 结语

本文使用新建立的排放载荷分析方法模拟了EPRI/CE实验,通过和实验结果对比显示热工水力关键参量变化及载荷计算结果都是合理的,因此验证了所建立的排放载荷分析方法的合理性。

选择了阀门开启时间、水封温度、水封体积这三个关键参量作为敏感性分析对象,研究显示阀门开启时间大小对载荷影响很大,在一定的范围内,阀门开启时间越短、载荷峰值越大;水封温度和水封体积对载荷影响规律较为复杂,这主要是由于水封质量和加速度两个竞争效应同时存在,使得无法确切地评估其对载荷的影响。从分析结果来看,若上游水封温度超过阀门下游管线初始压力对应的饱和温度时,会大大降低载荷峰值。此外,从保护管道支撑的角度出发,水封体积不宜设计过大,并且可以通过敏感性分析获得在一定要求范围内的最佳水封体积大小设计。

后续会将新建立的排放载荷分析方法运用至工程设计中,并且尝试将载荷处理方法开发为可以与RELAP5程序或自主研发的系统分析程序耦合的分析模块为排放管线设计提供指导性建议。

参考文献

1 吴丹,付冉,王燕萍,等. 两相排放载荷分析方法研究[J]. 核动力工程, 2015, 36(2): 160–164. DOI: 10.13832/j.jnpe.2015.02.0160.

WU Dan, FU Ran, WANG Yanping, et al. Study on analysis method for two phase discharge force[J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36(2): 160 – 164. DOI: 10.13832/j.jnpe.2015.02.0160.

- 2 Jiang S, Fu Z, Hohorst J. Hydrodynamic loads calculation of pressurizer safety valve discharge piping using RELAP/SCDAPSIM[C]. Proceedings of ASME Conference on 2018 26th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE-26-82035, 2018. DOI: 10.1115/ICONE26-82035.
- 3 齐炳雪, 俞冀阳. RELAP5 程序的临界流模型分析[J]. 核安全, 2012, 11(4): 63–66, 2. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2012.04.017.
- QI Bingxue, YU Jiyang. Analysis of critical flow model in RELAP5[J]. Nuclear Safety, 2012, 11(4): 63 – 66, 2. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2012.04.017.
- 4 Brooks C S, Hibiki T, Ishii M. Interfacial drag force in one-dimensional two-fluid model[J]. Progress in Nuclear Energy, 2012, 61: 57–68. DOI: 10.1016/j.pnucene.2012.07.001.
- 5 Stubbe E J, VanHoenacker L, Otero R. RELAP5/MOD3 assessment for calculation of safety and relief valve discharge piping hydrodynamic loads[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), NUREG/IA-0093, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1994. DOI: 10.2172/10142695.
- 6 House R K, Langerman M A, Caraher D L. Application of RELAP5/MOD1 for calculation of safety and relief valve discharge piping hydrodynamic loads[R]. EPRI NP-2479, 1982.