

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ПО НАДЕЖНОСТИ ГИДРОУДАРОВ НА НАСОСЫ ТЕПЛОВЫХ И ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

В.И. Скалозубов, Чжоу Хуишуй, О.А. Чулкин, Д.С. Пирковский
Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина
E-mail: bourne92@ukr.net

На основе общих положений теории теплогидродинамической неустойчивости предложен метод моделирования условий возникновения критических по надежности гидроударов на напорные насосы трубопроводных систем тепловых и ядерных энергоустановок. Установлено, что доминирующим фактором условий возникновения теплогидродинамической неустойчивости и критических гидроударов является инерционность чувствительности расходной (сетевой) характеристики напорных насосов трубопроводных систем. При минимально допустимой (критической) чувствительности расходной характеристики амплитуды колебаний скорости (расхода) потока достигают критических значений, при которых происходит отказ по работоспособности рабочих элементов насосов. Возникновение критических гидроударов соответствует переходу колебательной теплогидродинамической неустойчивости в аperiodическую. Перспективным подходом в отношении предотвращения критических гидроударов представляется приоритет использования насосов с наиболее чувствительной расходной (сетевой) характеристикой (при прочих равных технических возможностях).

АКТУАЛЬНОСТЬ

Явление теплогидродинамической неустойчивости (нестабильности) заключается в возникновении условий автоколебательных (самоподдерживающихся) и/или аperiodических (импульсных) процессов изменения теплогидродинамических параметров (давления, скорости, паросодержания и т. п.) потоков в системах теплотехнического оборудования (насосы, арматура, теплообменники и т. п.) и трубопроводов тепловых и ядерных энергоустановок. Возникновение условий теплогидродинамической неустойчивости (нестабильности) (ТГН) приводит к дополнительным гидродинамическим нагрузкам на конструкции теплотехнического оборудования и трубопроводов (гидроудары), повышает вибрационное состояние и влияет на надежность их эксплуатации в рабочих, переходных и аварийных режимах. В предельных случаях условий критических по надежности гидроударов (КГУ) происходит отказ на выполнение проектных функций эксплуатации и/или разрушение конструкций теплотехнического оборудования и трубопроводов (ТООТ).

Вопросы определения причин и условий возникновения ТГН, а также влияния ТГН на надежность систем ТООТ исследуются достаточно давно (например, [1–9] и др.). В частности, в работах В.А. Герлига [4] исследовались вопросы определения условий возникновения ТГН в парогенерирующих каналах, котловом объеме парогенераторов и теплообменном оборудовании; в работах А.В. Королева [5] изучались вопросы определения условий гидроударов в трубопроводах с двухфазными потоками; в работах В.И. Скалозубова [6] изучались вопросы определения условий возникновения термоакустической неустойчивости

теплоносителя в активной зоне ядерного реактора и ее влияния на целостность оболочек тепло-выделяющих элементов; в работах [6, 7] исследовались вопросы определения условий возникновения аperiodической ТГН и гидроударов на рабочие элементы арматуры ядерных энергетических установок и т. д.

Однако вопросы определения причин и условий возникновения КГУ, вызванных гидродинамической неустойчивостью в трубопроводных системах с напорными насосами, изучены крайне недостаточно. Так, в последних разработках А.В. Королева [8, 9] в качестве механизма возникновения колебательной гидродинамической неустойчивости определены резонансные эффекты совпадения собственной частоты колебаний трубопровода и частоты возмущений гидродинамических параметров от работающего насоса. Основные ограничения практического применения этого подхода заключаются в том, что резонансные эффекты являются предельно частным случаем условий возникновения ТГН и не охватывают все возможные рабочие, переходные и аварийные режимы эксплуатации напорных насосов. Кроме того, в [8, 9] отсутствуют достаточные обоснования возникновения КГУ на рабочие элементы насосов, вызванные резонансными эффектами.

Определяющими факторами возникновения гидродинамической неустойчивости и критических (для надежности насосов) гидроударов в широких диапазонах изменения режимных параметров могут быть специфические особенности расходных (сетевых) характеристик непосредственно насосов, т. е. зависимости гидродинамического напора от скорости движения или расхода потока, что и определяет актуальность этой работы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ГИДРОУДАРОВ НА НАСОСНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

1. Рассматривается характерная (типичная) для тепловых и ядерных энергоустановок трубопроводная система теплотехнического оборудования (рис. 1). Условно трубопроводная магистраль разделена на подающую и напорную магистрали длиной соответственно L_1 и L_2 .

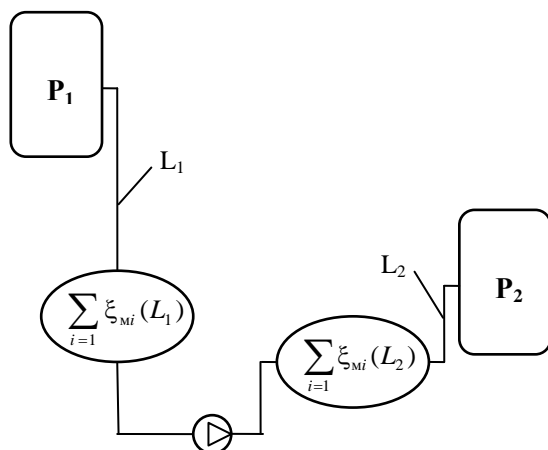


Рис. 1. Типичная трубопроводная система теплотехнического оборудования

2. Полагается, что необходимым условием возникновения КГУ на рабочие элементы насосов является ТГН потока, которая заключается в отклонении гидродинамических параметров от установившихся (стабильных) значений.

Достаточным условием возникновения КГУ является отказ по работоспособности насоса, вызванный критическими гидродинамическими нагрузками на рабочие элементы и превышающие предельно допустимые значения $N_{кр}$. Максимально допустимые (критические) значения массового расхода $G_{кр}$ и/или средней скорости потока $v_{кр}$:

$$G \geq G_{кр} = F \sqrt{2\rho N_{кр}}; \quad v \geq v_{кр} = \sqrt{\frac{2N_{кр}}{\rho}}, \quad (1)$$

где G , v – текущие значения массового расхода и средней скорости потока соответственно; F – площадь проходного сечения трубопровода; ρ – плотность потока; $N_{кр}$ – максимально допустимые нагрузки на рабочие элементы насоса, определяемые его конструктивно-техническими характеристиками.

3. Определяющие параметры условий возникновения ТГН и КГУ.

Расходная (сетевая) характеристика зависимости гидродинамического напора насоса ΔP_n от массового расхода G или средней скорости потока в трубопроводной системе v

$$\Delta P_n = f(G); \quad \Delta P_n = f(v). \quad (2)$$

Чувствительность расходной (сетевой) характеристики к изменениям расхода/скорости потока

$$f' = \frac{d\Delta P_n}{dG} \quad \text{или} \quad f' = \frac{d\Delta P_n}{dv}. \quad (3)$$

Для напорных насосов проектная чувствительность расходной (сетевой) характеристики

$$f'(G, v) \leq 0. \quad (4)$$

Условия вскипания потока в подающей магистрали (на входе потока в насос), которые определяются снижением статического давления P ниже давления насыщения при определенной температуре потока P_s :

$$P(G, v) \leq P_s. \quad (5)$$

В случае реализации условий (5) на входе в насос возникают интенсивное парообразование (вскипание) и кавитация с образованием локального парового объема и «снарядного» режима течения (с переменностью жидкой и паровой фаз потока) [5]. Этот режим может приводить к мощным импульсным гидродинамическим воздействиям на рабочие элементы насоса в результате резкого локального падения гидродинамического сопротивления и увеличения скорости жидкостного «снаряда» пропорционально отношению ρ/ρ_n (ρ_n – плотность паровой фазы).

Консервативно (т. е. с «запасом» по надежности) полагается, что режим при условии (5) соответствует условиям возникновения КГУ на рабочие элементы насоса.

4. Возникновение колебательной гидродинамической неустойчивости в рассматриваемой трубопроводной системе определяется инерционным запаздыванием соответствующих изменений расходной (сетевой) характеристики насоса и гидродинамического сопротивления магистрали: увеличение расхода G /скорости v потока в текущий момент времени t в соответствии с формулой (3) через интервал времени Δt приводит к уменьшению гидродинамического напора насоса ΔP_n и увеличению общего гидродинамического сопротивления магистрали ΔP_0 ; уменьшение гидродинамического напора ΔP_n и увеличение ΔP_0 через интервал Δt приводит к дальнейшему уменьшению G/v и т. д. Таким образом, возникает колебательный процесс:

$$\begin{aligned} \uparrow G, v(t) &\Rightarrow \uparrow \Delta P_0; \\ \downarrow \Delta P_n(t + \Delta t) &\Rightarrow \downarrow G, v(t + 2\Delta t) \Rightarrow \downarrow \Delta P_0; \\ \uparrow \Delta P_n(t + 2\Delta t) &\Rightarrow \uparrow G, v... \end{aligned} \quad (6)$$

При недостаточной текущей чувствительности расходной характеристики насоса f' период и амплитуда колебаний расхода (скорости) увеличиваются и могут достигать критических значений (1), при которых система фактически переходит в состояние аperiodической неустойчивости [4, 6]. Любое случайное (флуктуационное) возмущение гидродинамических параметров приводит к импульсному («скачкообразному») переходу трубопроводной системы в состояние с КГУ на насос при «запирании» напорного участка трубопроводной магистрали (условие КГУ (1)) или при резком локальном снижении гидродинамического сопротивления и увеличении скорости потока (условие КГУ (5)).

При допущениях несжимаемости жидкости и изотермичности процессов уравнения движения потока в рассматриваемой трубопроводной системе и текущего изменения гидродинамического напора насоса имеют:

$$\rho L \frac{dv}{dt} = \Delta P_n(v) + P_1 - P_2 - \Delta P_1(v) - \Delta P_2(v), \quad (7)$$

$$\Delta P_n = \Delta P_{nm} + \int_0^t f'(v) \frac{dv}{d\tau} d\tau \quad (8)$$

при начальных условиях

$$v(t=0) = 0, \quad (9)$$

$$\Delta P_n(t=0) = \Delta P_{nm}, \quad (10)$$

где ρ – плотность среды потока; L – длина трубопроводной магистрали; ΔP_{nm} – максимально возможный гидродинамический напор насоса, определяемый его техническими характеристиками; t – текущее время; v – средняя скорость потока; f' – текущая чувствительность расходной характеристики насоса; P_1, P_2 – статическое давление в объектах источника и потребления соответственно (см. рис. 1).

Гидродинамические сопротивления на подающей L_1 и напорной L_2 магистралях следующие:

$$\Delta P_1 = \left[\xi_{тр} \frac{L_1}{D} + \sum_{i=1} \xi_{mi}(L_1) \right] \rho v^2 - \rho g \sum_{j=1} h_j \text{sign}[v_j(L_1)], \quad (11)$$

$$\Delta P_2 = \left[\xi_{тр} \frac{L_2}{D} + \sum_{i=1} \xi_{mi}(L_2) \right] \rho v^2 - \rho g \sum_{j=1} h_j \text{sign}[v_j(L_2)], \quad (12)$$

где $\xi_{тр}, \xi_{mi}$ – коэффициенты транспортных и местных гидродинамических потерь на магистралях соответственно; D – диаметр проходного сечения трубопроводов; g – ускорение силы тяжести; h_j – высота вертикальных участков трубопроводной системы;

$$\text{sign}(v) = \begin{cases} 1, & \text{для опускных течений;} \\ -1, & \text{для подъемных течений.} \end{cases}$$

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ГИДРОУДАРОВ ПРИ ТЕПЛОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Для приведения уравнений к критериальной форме введем безразмерные переменные гидродинамических параметров и их соответствующих масштабов (m):

$$v = \frac{v}{v_{кр}}; t = \frac{t}{t_m}; \Delta P_n = \frac{\Delta P_n}{\Delta P_{nm}}; P = \frac{P}{\Delta P_{nm}}.$$

Тогда в критериальной форме уравнения (7) и (8) имеют вид:

$$\rho \frac{L v_{кр}}{\Delta P_{nm} t_m} \frac{dv}{dt} = \Delta P_n + P_1 - P_2 - \Delta P_1 - \Delta P_2, \quad (13)$$

$$\Delta P_n = 1 + \int_0^t \frac{d\Delta P_n}{dv} \frac{dv}{d\tau} d\tau. \quad (14)$$

Временной масштаб процесса t_m следует из (13):

$$\frac{\rho L v_{кр}}{\Delta P_{nm} t_m} \equiv 1 \Rightarrow t_m = \frac{\rho L v_{кр}}{\Delta P_{nm}}. \quad (15)$$

Критическая для КГУ скорость потока следует из условий (1) и (5):

$$v_{кр} = \min \left\{ \sqrt{\frac{2N_{кр}}{\rho}}, \sqrt{\frac{2[P_1(L_1) - P_s]}{\rho}} \right\}. \quad (16)$$

Таким образом, имеем уравнение движения потока в критериальной форме:

$$\frac{dv}{dt} = 1 + \int_0^t \frac{d\Delta P_n}{dv} \frac{dv}{d\tau} d\tau + P_1 - P_2 - \Delta P_1 - \Delta P_2, \quad (17)$$

$$v(t=0) = 0. \quad (18)$$

Уравнение (17) является нелинейным дифференциальным уравнением, не имеющим в общем случае аналитических решений. В этом случае решения могут быть получены численными методами интегрирования.

При допущении линейной аппроксимации чувствительности расходной (сетевой) характеристики насоса

$$f'(v) = -\kappa \quad (\kappa > 0) \quad (19)$$

уравнение (17) сводится к следующему уравнению:

$$\frac{dv}{dt} = A + Bv - Cv^2, \quad (20)$$

где

$$A = 1 + \frac{\rho g \sum_{j=1} h_j \text{sign}[v_j(L)]}{\Delta P_{nm}} + \frac{P_1 - P_2}{\Delta P_{nm}},$$

$$B = -\kappa \frac{v_{кр}}{\Delta P_{nm}},$$

$$C = \left[\xi \frac{L}{D} + \sum_{i=1} \xi_{mi}(L) \right] \frac{\rho v_{кр}^2}{\Delta P_{nm}}.$$

Аналитическое решение уравнения (20) имеет вид:

$$\frac{\sqrt{B^2 + 4AC} - B + 2Cv}{\sqrt{B^2 + 4AC} + B - 2Cv} = \exp(\text{const} + \sqrt{B^2 + 4AC}t), \quad (21)$$

$$v(t=0) = 0.$$

Условие возникновения КГУ

$$v \geq 1. \quad (22)$$

Характерный пример решения (21) в критериальной форме приведен на рис. 2. Это позволяет сделать следующие основные выводы.

ВЫВОДЫ

1. Доминирующим фактором условий возникновения теплогидродинамической неустойчивости и критических гидроударов является инерционность чувствительности расходной (сетевой) характеристики напорных насосов трубопроводных систем. При минимально допустимой (критической) чувствительности расходной характеристики амплитуды колебаний скорости (расхода) потока достигают критических значений, при которых происходит отказ по работоспособности рабочих элементов насосов.

Возникновение критических гидроударов соответствует переходу колебательной теплогидродинамической неустойчивости в аperiодическую.

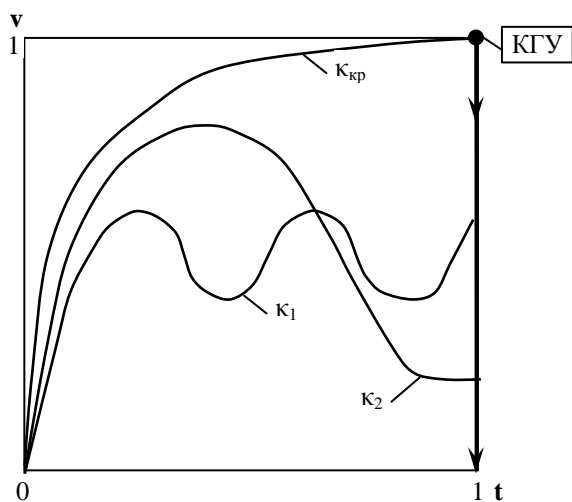


Рис. 2. Изменение средней скорости потока при ТГН с разной чувствительностью расходной (сетевой) характеристики насоса при коэффициентах линейной аппроксимации $K_1 > K_2 > K_{кр}$

2. Стабилизирующим фактором предотвращения условий теплогидродинамической неустойчивости с повышенными амплитудами изменений гидродинамических параметров является гидродинамическое сопротивление трубопроводной системы.

Однако основные ограничения технических решений по «искусственному» повышению гидродинамического сопротивления на подводящей к насосу части трубопроводной системы связаны с опасностью возникновения кавитационных эффектов, а на напорном участке – с опасностью «запирания» расхода потока в объект потребления.

3. Перспективным подходом в отношении предотвращения критических гидроударов представляется приоритет использования насосов с наиболее чувствительной расходной (сетевой) характеристикой (при прочих равных технических возможностях).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Н.Е. Жуковский. *О гидродинамическом ударе в водопроводных системах*. М.-Л.: ГИТТЛ, 1949, 100 с.

2. *Аварии на объектах котлонадзора и меры по их предупреждению*: Информационное письмо Госгортехнадзора. М.: «Недра», 1965, 174 с.

3. С.А. Хачатурян. *Волновые процессы в компрессорных установках*. М.: «Машиностроение», 1983, 222 с.

4. В.А. Герлига, В.Б. Хабенский. *Нестабильность потока теплоносителя в энергооборудовании*. М.: «Энергоиздат», 1994, 288 с.

5. А.В. Королев. *Анализ и моделирование теплоэнергетического оборудования, работающего с двухфазными течениями*. Одесса: «Астропринт», 2010, 456 с.

6. В.И. Скалозубов, А.А. Ключников, Ю.А. Комаров, А.В. Шавлаков. *Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР*. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010, 200 с.

7. В.И. Скалозубов, А.С. Мазуренко, И.Л. Козлов, В.Н. Ващенко и др. *Комплекс методов переоценки безопасности атомной энергетики с учетом уроков экологических катастроф в Чернобыле и Фукусиме*. Одесса: «Астропринт», 2013, 244 с.

8. А.В. Королев, Х.Ю. Чжоу. Исследование динамики поршневого насоса в нормальном режиме и при срыве подачи // *Холодильная техника*. 2016, в. 5. №52, с. 4-8.

9. O.V. Korolyov, Zhou Hui Yu. Dynamic damper fluctuation in the pumping systems // *Pratsi OPU*. 2016, issue 1(48), p. 35-41.

10. В.Н. Васильченко, Е.З. Емельяненко, В.И. Скалозубов и др. *Моделирование аварий на ядерных энергетических установках атомных электростанций*. Одесса: «Резон», 2002, 466 с.

11. М.А. Будаев, А.Д. Васильев, Ю.А. Звонарев. Генерация водорода при осушении бассейна выдержки во время аварии с полным обесточиванием на АЭС // *Материалы 8-й Междунар. научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Обнинск, 28–31 мая 2013 г.)*. Обнинск (Россия), 2013.

12. В.И. Скалозубов, А.А. Ключников, В.Н. Колыханов. *Основы управления проектными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР*. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010, 400 с.

Статья поступила в редакцию 18.07.2017 г.

МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ ВИНИКНЕННЯ КРИТИЧНИХ ЩОДО НАДІЙНОСТІ ГІДРОУДАРІВ НА НАСОСИ ТЕПЛОВИХ ТА ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК

В.І. Скалозубов, Чжоу Хуіюй, О.А. Чулкін, Д.С. Пірковський

На основі загальних положень теорії теплогидродинамічної нестійкості запропоновано метод моделювання умов виникнення критичних щодо надійності гідроударів на напорні насоси трубопровідних систем теплових та ядерних енергоустановок. Установлено, що домінуючим фактором умов виникнення теплогидродинамічної нестійкості і критичних гідроударів є інерційність чутливості витратної (мережної) характеристики напорних насосів трубопровідних систем. При мінімально припустимій (критичній) чутливості витратної характеристики амплітуди коливань швидкості (витрати) потоку досягають критичних значень, при яких виникає відмова щодо працездатності робочих елементів насосів. Виникнення критичних

гідродарів відповідає переходу коливальної теплогідродинамічної нестійкості в аперіодичну. Перспективним підходом щодо запобігання критичних гідродарів виглядає пріоритет використання насосів із найбільш чутливою витратною (мережною) характеристикою (за інших рівних технічних можливостей).

MODELLING METHOD OF CONDITIONS FOR RELIABILITY-CRITICAL HYDRAULIC IMPACTS ON PUMPS OF THERMAL AND NUCLEAR POWER PLANTS

V.I. Skalozubov, Zhou Huiyu, O.A. Chulkin, D.S. Pirkovskiy

Based on general provisions of the hydrodynamic instability theory the modelling method of conditions for reliability-critical hydraulic impacts on force pumps of pipeline systems of thermal and nuclear power plants is offered. It is revealed that inertia of sensitivity of the flow (network) characteristic of force pumps of pipeline systems is the dominating factor for hydrodynamic instability conditions and critical hydraulic impacts. When sensitivity of the flow characteristic is minimum (critical) total amplitudes of the rate flow reach critical values and an inoperative failure of pump elements occurs. Appearance of critical hydraulic impacts corresponds to transfer of oscillatory hydrodynamic instability to the aperiodic one. Using of pumps with the most sensitive flow (network) characteristic (with other equal technical capabilities) is perspective approach to prevent critical hydraulic impacts.