

**ВЪЗНИКВАНЕ И ВИДОВЕ КАВИТАЦИЯ В ХИДРАВЛИЧНИ МАШИНИ  
И СИСТЕМИ****OCCURRENCE AND TYPES OF CAVITATION IN HYDRAULIC  
MACHINES AND SYSTEMS****Georgi Panchev***Technical University of Gabrovo***Hristo Hristov***Technical University of Gabrovo***Abstract**

*The presented article reviews the publications on the problems of the mechanism of occurrence and action of cavitation in hydraulic machines and systems. A classification of the types of cavitation was made. Modern methods of cavitation testing in hydraulic machines are examined.*

**Keywords:** Cavitation; Hydraulics machinery.

**ВЪВЕДЕНИЕ**

В областта на хидравличните задвижвания най-вредното и разрушително явление по време на работата на хидравличните машини е появата на кавитация. При оразмеряването и конструктивното изпълнение, инженерите е необходимо да се съобразят с условията, при които се поражда кавитация и да се стремят да избегнат пораждането ѝ. В настоящият статия се разглеждат условията за пораждаване на кавитация, типовете кавитация и присъствието ѝ в елементите и машините на силовите хидравлични задвижващи системи.

**ИЗЛОЖЕНИЕ**

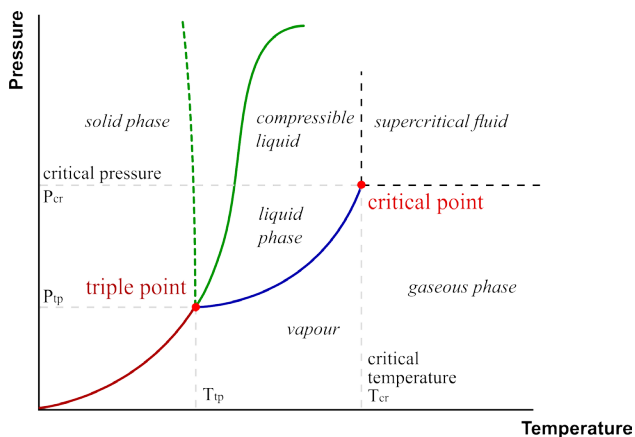
Кавитацията е комплексен феномен на двуфазно течение, включващ възникване, растеж и разрушаване на газови или парогазови мехури. Терминът *кавитация* е цитиран за пръв път от R. E. Froude, S. W. Barnaby и Charles Parson във връзка с разрушаване на витлата при ранните параходи. През 1895 г. Parson прави първият воден тунел за проучване на кавитацията. След 20 години експерименти той доказва връзката между кавитацията и ерозията на витлата на параходите.

Когато определен обем течност се нагрява под постоянно налягане или когато ней-

ното налягане се намалява при постоянна температура със статични или динамични средства, се достига състояние, при което мехурчета или кухини, напълнени с пари на течността или газ, стават видими и растат. Растежът на мехурчетата може да бъде с номинална скорост, ако е чрез дифузия на разтворени газове в кухината или просто чрез разширяване на съдържанието на газ с повишаване на температурата или намаляване на налягането. Нарастването на балона ще бъде взривоопасно, ако е предимно резултат от изпаряване в кухината. Това състояние е известно като кипене, ако е причинено от покачване на температурата при постоянно налягане и кавитация, ако е причинено от намаляване на налягането при постоянна температура. Растежът на мехурчетата чрез дифузия се нарича *дегазиране*, или още *газова кавитация* (за разлика от *парообразната кавитация*), когато се индуцира чрез намаляване на налягането. Тази класификация е представена от R. T. Knapp, 1970 [1].

Състоянието на веществата в зависимост от температурата и налягането се представя фазови диаграми. Фиг. 1 показва типичните графики на налягането,  $p$  и температурата,  $T$ , в които е посочено състоянието на веществото. Тройната точка е тази точка във фазовата диаграма, при която се срещат едно-

временно твърдо, течно и газообразно състояния; т.е. веществото има три алтернативни стабилни състояния. Линията на насищане течност / пара се простира от тази точка до критичната точка.



Фиг. 1. Фазова диаграма

На тази линия парата и течното състояние представляват две ограничаващи форми на едно "аморфно" състояние, едната от които може да бъде получена от другата чрез изотермични обемни промени, водещи до междинни, но нестабилни състояния. Според Frenkel (1955), "Благодарение на тази нестабилност действителният преход от течно към газообразно и обратно се извършва не по теоретична изотерма (прекъснатата линия, вдясно, Фиг. 1), а по хоризонтална изотерма (плътната линия), съответстваща на разделянето на началното хомогенно вещество на две различни съпътстващи фази...". Критичната точка е точката, в която максимумата и минимумата в теоретичната изотерма изчезват и прекъсването изчезва. Течност при постоянна температура може да бъде подложена на понижаване на налягането,  $p$ , което пада под налягането на насищане на парите,  $p_v$ . Стойността на  $(p_v - p)$  се нарича напрежение,  $\Delta p$  и величината, при която се получава разкъсване, е якостта на опън на течността,  $\Delta p_c$ . Процесът на разкъсване на течността чрез намаляване на налягането при приблизително постоянна температура на течността често се нарича "кавитация". Течност при постоянно налягане може да бъде подложена на температура  $T$ , над нормалната температура на насищане  $T_s$ . Стойността  $\Delta T = T - T_s$  е *прегръване*

*нето* и точката, в която се образува пара,  $\Delta T_c$ , се нарича критична точка на прегръване. Процесът на разкъсване на течността чрез повишаване на температурата при приблизително постоянно налягане често се нарича "кипене".

Има няколко начина за класифициране на кавитацията. Тук е представена класификация за режима на течението (газообразна, псевдо - парообразна кавитация). Р. Т. Кларк предлага класификация, която да отговаря на условията, при които се осъществява кавитация, както и на основните физически характеристики. Тази класификация прави разлика между следните видове кавитация:

### 1. Подвижна кавитация

В този случай, отделни преходни кухини или мехурчета се образуват в течността и се движат с нея, докато се разширяват, свиват и се разрушават. Тези кухини се движат непрекъснато с местната скорост на течащата течност. Движещите се кухини стават видими в течността, която е много близо до граничната повърхност в зоната на минималното налягане. Те се разрастват по време на тяхното преминаване през областта на ниско налягане и започват да се разпадат скоро след като са отнесени към област чието налягане надвишава налягането на насищане на парите. Свиването до невидим размер често е последвано от поредица повтарящи се разширявания и повторни свивания, които предполагат пулсации на налягането.

### 2. Съпровождаща кавитация

Отнася се до ситуацията след началото, при която течността се отделя от твърдата граница на потопеното тяло до образуване на джоб или кухина, прикрепена към границата. Фиксираните кухини понякога имат вид на силно турбулентна кипяща повърхност или в други случаи повърхността между течността и големите каверни може да бъде толкова гладка, дори прозрачна. Забелязано е, че течността съседна на повърхността на големите каверни съдържа множество малки подвижни кухини. Тези движещи се кухини растат бързо до почти максималния си размер в горния край на основната кухина и остават доста постоянни, до-

като не достигнат долния край на кухината и изчезнат. Прекъсването може да стане чрез връщането на основното течение към твърдата повърхност по направление на движението към водещия ръб или откъсващата линия, или кухината може да се простира далеч отвъд тялото, преди главният течностен поток да се затвори заедно, обгръщайки джоба, което е известно като *свръхкавитация*.

### 3. Вихрова кавитация

Флуидно течение с концентрирано центробежно движение може да развие кавитация в центъра си поради генериране на ниски налягания в „сърцето“ на потока. Типичният пример на този тип кавитация може да се развие ако Von Kármán - вихрово откъсване се появи в края на хидрокрило и налягането е достатъчно ниско. В резултат на това се появяват нарастващи колебания синхронизирани с честотата на появата на откъсванията. Вихровата кавитация може да се появи и в каналните течения на хидравличните машини, когато те работят при частично натоварване. В случай, когато честотата на кавитационните колебания съвпадне с естествена, елементи от машините се подлагат на умора и последващо разрушение. Този тип кавитация често се нарича върхова кавитация.

### 4. Вибрираща кавитация

Силите, които причиняват образуването и разпада на кухините, се дължат на непрекъснатата серия от големи амплитуди на високочестотни пулсации на налягането в течността [1].

Въпреки че кавитацията може да се увеличи поради лоша конструкция, тя може да се появи дори при най-добре проектирано оборудване, когато последното работи при неблагоприятни условия. За съжаление, в областта на приложната хидродинамика, ефектите на кавитацията са нежелателни (с много малко изключения). В областта на хидравличните машини е установено, че кавитацията може да се случи във всички типове турбини (от ниска специфична скорост Francis до висока специфична скорост Kaplan), в центробежни и осови помпи и в

обемни помпи. Кавитацията може да възникне и при устройства, които не участват в трансформация на механична енергия, като например клапани или фитинги, при които има промяна в скоростта на преминаващия през тях флуид, като дебитомери, вентури метри, бленди или дюзи.

Може би най-същественният проблем, причинен от кавитацията, е материалното увреждане, което кавитационните мехурчета могат да причинят, когато се разпаднат в близост до твърда повърхност. Проблемът е сложен, защото включва подробности за сложен нестабилно течение, комбинирано с реакцията на конкретния материал, от който е направена твърдата повърхност. Вдлъбнатината, причинена от колапса на каверните, създава голямо износване на компонентите и може драстично да съкрати живота на помпата.

Колапсът на каверните е бурен процес, който генерира високи локални амплитудни смущения и шокове в течността в момента на колапса. Повтарянето на това натоварване, дължащо се на множество срывове на балончета, може да доведе до повреда в локалната повърхност на умората и отделяне на парчета от материал. Това е общоприето обяснение за увреждане на кавитацията. То е в съответствие с появата на увреждане на кавитацията при повечето обстоятелства. За разлика от ерозията, дължаща се на твърдите частици в течението, при която повърхността изглежда гладко износена от драскотини, дължащи се на по-големи частици, увреждането на кавитацията има кристален и назъбен външен вид на умората. Кавитацията най-детайлно е представена от Brenen, 1995 [2], Franc и Michel, 2004 [3], Ishii и Hibiki, 2011 [4].

Yang, Yeh и Jaw, 2009 [9] използват платформено устройство с U-образна форма за генериране на единичен кавитационен балон за подробен анализ на характеристиките на флуидното поле и причината за противоположната струя по време на процеса на разпад на балона, причинен от предаването на ударна вълна. Те използват високоскоростна камера за запис на поточно поле на разпада на мехурчетата на различни разстояния от твърдата граница. Установено е, че вихърът Kelvin–Helmholtz

се образува, когато течният струйник прониква в повърхността на мехурчетата, след като мехурчето се компресира и деформира. Dular, M. и др., 2004 [5] провеждат проучване на визуалните и ерозионни ефекти на кавитацията върху прости единични крилни профили в кавитационен тунел. За експериментите се използва двумерен крилен профил с кръгъл водещ ръб. Тънко медно фолио, приложено върху повърхността на крилото е използвано като ерозионен сензор. Наблюдаван е кавитационен феномен над крилни профили при различни условия на течението (налягане на системата, съдържание на воден пари). Установена е връзка между характеристиките на кавитационните структури и увреждането от кавитацията.

Katakura и др., 1984 [6] представят теоретичните и експерименталните резултати за разтворимостта на въздуха в хидравлично масло, както и експерименталните резултати за коефициента на дифузия на разтворения въздух в масла от 5 различни типа, които могат да повлияят на диаметъра на мехурчетата в стационарно масло. Те обобщават, че мехурът чийто диаметър се променя при ниско или високо налягане, му е необходим дълъг период от време, за да възстанови първоначалния си размер в стационарно масло.

Fivel и др. [7] заключават, че прогнозирането на ерозионните щети на кавитацията сега е в обхвата на цифровата симулация. Предлаганият метод изисква първо да се оцени разпределението на натоваването на удара в резултат на разпада на кавитационния мехур.

Antoniak, P. [8] чрез един от най-новите експериментални методи, използвани за подобряване на параметрите на героторни помпи, е използването на високоскоростна цифрова камера, която позволява да се визуализират процесите на потока във вътрешните канали на помпите. Въз основа на това наблюдение са определени опасните зони (т.е. зоните, където може да възникне кавитацията) на каналите, които трябва да

бъдат преработени. В тази статия е показано приложението на метода за изследване на реалния флуиден поток в героторна помпа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представената статия е направен обзор на публикациите относно проблемите на механизма на възникване и действие на кавитацията в хидравлични машини и системи. Направена е класификация на видовете кавитация. Разгледани са съвременни методи за изследване на кавитацията в хидравлични машини.

## REFERENCE

- [1] Del Campo Sud, D., Analysis of the suction chamber of external gear pumps and their influence on cavitation and volumetric efficiency. PhD thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, March 2012.
- [2] Brennen, C. E., Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford University Press, 1995.
- [3] Franc, J. P., Michel, J.M., Fundamentals of Cavitation. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [4] Ishii, M., Hibiki, T., Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow. Second Edition. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2011.
- [5] Dular, M., Bachert, B., Stoffel, B., Sirok, B., Relationship between cavitation structures and cavitation damage, Chair of Turbomachinery and Fluid Power, Darmstadt University of Technology, Wear 257 (2004) 1176-1184p.
- [6] Katakura, H., Tsuji, S., Yamane, R., Fujita, H., *A Research on Air in Oils. Bulletin of JSME*, Vol. 27, No. 231, September 1984.
- [7] Fivel, M., Franc, J., and Roy, S. C., Towards numerical prediction of cavitation erosion, [rsfs.royalsocietypublishing.org](http://rsfs.royalsocietypublishing.org) Interface Focus 5: 20150013
- [8] Antoniak, P., Experimental studies of flows inside derotor pumps with use of high-speed camera., Wrocław University of Technology, Poland
- [9] Yang, S.-H., Yeh, K.-C., Jaw, S.-Y., Single cavitation bubble generation and observation of the bubble collapse flow induced by a pressure wave *Exp Fluids* (2009) 47:343–355