

УДК 681.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ НАСОСНЫХ КОМПЛЕКСОВ

А. Г. Лютов¹, М. Б. Новоженин²

¹lutov1@mail.ru, ²novozhenin.maxim@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 12.03.2018

Аннотация. Рассмотрены вопросы компьютерного моделирования и диагностики насосных комплексов для автоматизации процесса обеспечения безкавитационных режимов работы. Актуальность и необходимость решения данной проблемы обусловлена тем, что при эксплуатации насосных комплексов часто происходит изменение режима работы из-за воздействия различного рода возмущающих факторов, что зачастую приводит к появлению кавитации и, как следствие, уменьшению КПД и разрушению элементов насосного комплекса. Моделирование нестационарных режимов выполнено с помощью программных пакетов Turbomachinery CFD и CFTurbo. Использование предложенной модели в системе поддержки принятия решений при управлении насосным комплексом позволяет обеспечить безкавитационные режимы его работы в условиях нестационарности внешних и внутренних факторов.

Ключевые слова: насосный комплекс; нестационарные режимы; кавитация; центробежный насос; численное моделирование; диагностика режима; управление режимами; прецедент.

ВВЕДЕНИЕ

Насосные комплексы (НК), под которыми понимается насос (насосы) и прилегающие к нему участки трубопровода, широко применяются в различных отраслях промышленности и народного хозяйства. В настоящее время широкое распространение получили автоматизированные НК с частотно-регулируемыми центробежными насосами [1]. При этом НК часто функционируют в условиях нестационарности, при которых появляются такие явления, как кавитация, гидравлический удар и автоколебания, что ведет к уменьшению КПД и срока службы оборудования. Нестационарные процессы при эксплуатации НК приводят к изменению режима его работы, нарушению сплошности потока жидкости и могут приводить к выкрашиванию металла и эрозионному износу элементов НК.

Наибольшую опасность для НК представляет кавитация. Кавитация ведет к выкрашиванию материала рабочего колеса и входного патрубка, к потере КПД установки и нарушениям в режиме функционирования НК. Диагностика таких нестационарных процессов затруднительна, так как отсутствуют четкие информативные параметры, по которым можно однозначно составить математическое описание режима работы, процедуры классификации и определить наличие данных процессов.

Появление нестационарных процессов при работе НК часто зависит от его конструктивных особенностей, поэтому изменение режимов функционирования целесообразно рассматривать на практических случаях, характеризующихся обобщенными условиями работы для определенного типа НК. В качестве примера в данной статье

рассмотрены НК на основе наиболее распространенного типа насосов – центробежных.

Для оценки величины кавитации можно воспользоваться кавитационной характеристикой [2], которая связывает величину кавитации с напором при постоянной частоте вращения и расходе (рис. 1).

Известно, что кавитация как нестационарный режим имеет деление на первый кавитационный и второй кавитационный режимы. Градация рабочих режимов происходит следующим образом. При образовании газа до 1% кавитацию не учитывают, режим классифицируют как рабочий; при 1–3% – первый кавитационный режим; более 3% – второй кавитационный режим. На практике допускается управление в первом кавитационном режиме, но более желательнее осуществлять управление на границе первого режима и рабочего режима.

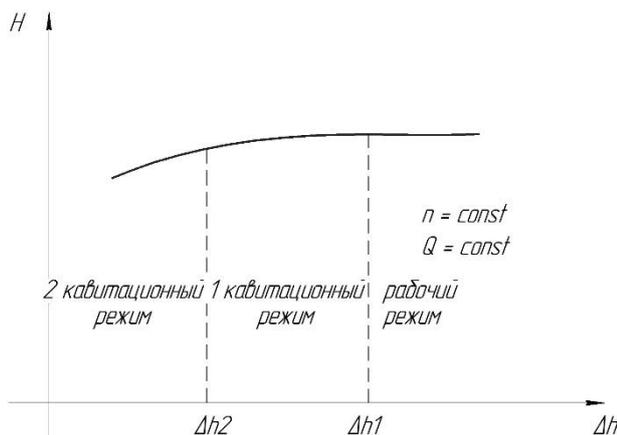


Рис. 1. Кавитационная характеристика центробежного насоса

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

Непосредственная прямая диагностика нестационарного процесса в НК является затруднительной. Более эффективным подходом является использование косвенных методов на основе построения и анализа численной модели исследуемого процесса.

Для определения факта наличия кавитации и последующего управления НК на основе прецедентов [3] была создана трехмерная модель центробежного насоса, позволяющая отобразить процессы газообразования в насосе при его функционировании. В качестве инструментария при создании

трехмерной модели центробежного насоса и моделирования течения потока жидкости наиболее целесообразно воспользоваться САПР турбомашин CFTurbo [4]. Последовательный интерактивный алгоритм данной программы позволяет в удобной форме создать модель насоса для последующего ее исследования и применения.

Изначально задается основная настройка, которая включает в себя выбор проектной точки напорно-расходной характеристики, частоты вращения, вида перекачиваемой жидкости и начальных условий (рис. 2).

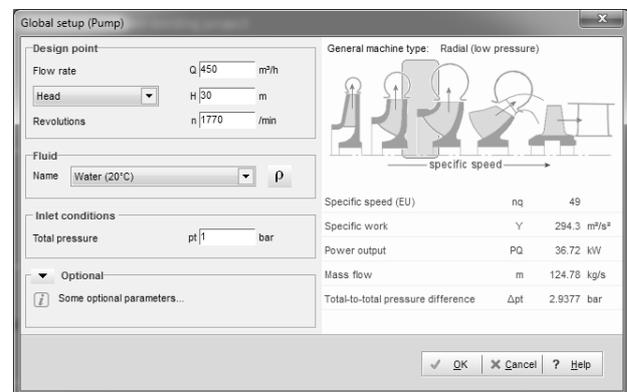


Рис. 2. Основные характеристики центробежного насоса, задаваемые в САПР CFTurbo

Далее происходит установка и коррекция основных размеров, таких как профиль лопаток, углы, спиральная зона развития, диффузор, габариты статора и т.д.

В процессе численного моделирования с применением данного пакета производится расчет других информационных характеристик, таких как КПД, крутящий момент и др.

Результатом моделирования является модель течения жидкости (рис. 3).

Для дальнейшего анализа созданной трехмерной модели воспользуемся программной средой для конечно-элементного анализа Turbomachinery CFD [5], используемой для расчета параметров турбомашин.

Моделирование производилось на основе модели центробежного насоса, полученной в САПР CFTurbo, при этом в качестве начальных были заданы характеристики среды моделирования в соответствии с табл. 1.

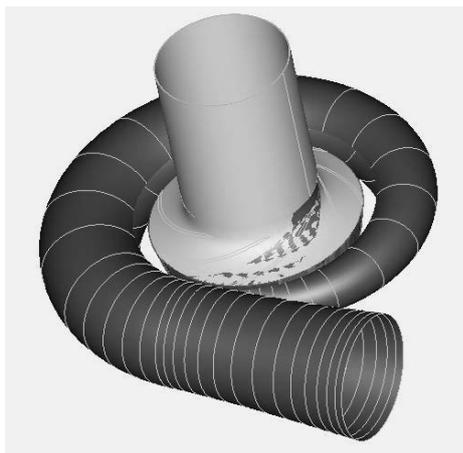


Рис. 3. Трехмерная модель течения жидкости в центробежном насосе, полученная с применением САПР турбомашин CFTurbo

Таблица 1

Характеристики среды моделирования

Характеристика	Значение
Fluid name (Название жидкости)	water
Dynamic viscosity (Динамическая вязкость)	0,001 Pa.s
Reference density (Исходная плотность)	998,2 kg/m ³
Reference pressure (Исходное давление)	400000 Pa
Reference temperature (Исходная температура)	293 K
Heat capacity ratio (Коэффициент теплоемкости)	1,33
Cavitation risk (Кавитационный риск)	Yes (Да)
Rotation speed (Скорость вращения)	-1770 RPM
Turbulence model (Модель турбулентности)	kOmegaSST
BC type (Тип граничного условия)	Volumetric flow rate (Объемный расход)
Time management (Управление временем)	Steady state (Состояние готовности)
Amount of points (Количество точек)	7
Volumetric flow rate (Объемный расход)	Point 1:0.186 Point 2:0.176 Point 3:0.166 Point 4:0.156 Point 5:0.146 Point 6:0.136 Point 7:0.126

Перед началом моделирования среда Turbomachinery CFD позволяет с помощью

команды Cavitation risk выбрать вывод графиков значений объема кавитации и кавитационной поверхности (рис. 4).

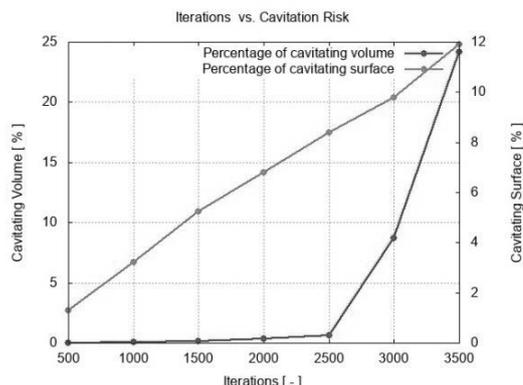


Рис. 4. Графики объема кавитации и кавитационной поверхности в программной среде конечно-элементного анализа Turbomachinery CFD

Вывод значений кавитационного объема в процентах является весьма удобным и позволяет эффективно оценить режим работы НК.

На время расчета модели существенно влияет количество рабочих точек, в которых производится моделирование (табл. 2). Характеристики производительности ПК: Intel(R) Core(TM) i5-2500K 3.30 GHz, ОЗУ 8Гб.

Таблица 2

Время моделирования в зависимости от количества рабочих точек

Количество точек	Время расчета
4	1:07:09
8	1:46:24

В связи с тем, что при большом количестве точек имеет место рост необходимого для моделирования машинного времени (за счет медленного сохранения отчета), было выбрано наиболее рациональное число рабочих точек в количестве семи.

Для определения важности информационных параметров, изменению подвергались следующие параметры [6]:

- динамическая вязкость;
- плотность;
- давление;
- температура;
- скорость вращения.

При этом основное внимание при анализе результатов моделирования уделялось оценке объема свободного газа, образующегося в результате кавитации.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДАВЛЕНИЯ

В качестве первой серии экспериментов было произведено моделирование процессов в центробежном насосе, при которой изменяемым параметром было исходное давление. Шаг составлял 25 000 Па. Результаты представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Результаты моделирования при изменении исходного давления в пределах 425–375 КПа

Объемный расход	Исходное давление 425 КПа	Исходное давление 400 КПа	Исходное давление 375 КПа
0,126	0,0025	0,0091	0,0386
0,136	0,0006	0,0041	0,0170
0,146	0,0000	0,0010	0,0065
0,156	0,0000	0,0000	0,0014
0,166	0,0000	0,0000	0,0000
0,176	0,0000	0,0000	0,0000
0,186	0,0000	0,0000	0,0000

Таблица 4

Результаты моделирования при изменении исходного давления в пределах 350–300 КПа

Объемный расход	Исходное давление 350 КПа	Исходное давление 325 КПа	Исходное давление 300 КПа
0,126	0,2485	23,6256	25,2090
0,136	0,1250	0,8403	24,9742
0,146	0,0416	0,3759	24,4105
0,156	0,0100	0,1487	1,1110
0,166	0,0020	0,0252	0,3684
0,176	0,0000	0,0026	0,1106
0,186	0,0000	0,0002	0,0130

Результаты каждого из экспериментов показывают, что количество пузырьков газа, высвобождаемых в процессе работы насоса, растет по нелинейному закону, при этом рост кавитации происходит более интенсивно при уменьшении давления до 300 КПа.

Переход насоса во второй кавитационный режим происходит при давлении 325–300 КПа, остальные режимы не входят даже в первый кавитационный режим.

По результатам экспериментов видно, что рост количества свободного газа имеет

лавинообразный характер. То есть при давлении 425–350 КПа разгазирование имеет очень малое значение, которое не влияет на режим работы оборудования, а при значениях давления 350–300 КПа разгазирование увеличивается более чем в 100 раз. При исходном давлении 325 КПа имеет место наличие кавитации в одной точке, а уже при 300 КПа – в 3 точках, поэтому дальнейшее понижение давления не целесообразно для моделирования.

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что в исходной точке центробежный насос обладает большим кавитационным запасом и не подвергается эрозии. При такой эксплуатации срок годности и КПД имеют максимальные значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Увеличение температуры приводит к изменению давления насыщенных паров жидкости, которое может быть меньше местного давления, что приведет к кавитации.

Было произведено моделирование режимов работы насосного комплекса с исходной температурой 293 К и 351,6 К. Результаты представлены в табл. 5–7.

Из результатов экспериментов следует, что повышение температуры способствует увеличению объема свободного газа при одинаковом значении давления; при этом наибольший интерес представляет исходное давление 350 КПа, для которого изменение температуры на 58,6° приводит к переходу во второй кавитационный режим.

Таблица 5

Результаты моделирования при изменении исходной температуры при давлении 400 КПа

Объемный расход	Исходная температура 351,6 К	Исходная температура 293 К
0,126	0,1360	0,0091
0,136	0,0634	0,0041
0,146	0,0201	0,0010
0,156	0,0060	0,0000
0,166	0,0008	0,0000
0,176	0,0000	0,0000
0,186	0,0000	0,0000

Таблица 6

Результаты моделирования при изменении исходной температуры при давлении 350 КПа

Объемный расход	Исходная температура 351,6 К	Исходная температура 293 К
0,126	24,9695	0,2485
0,136	24,6407	0,1250
0,146	22,3834	0,0416
0,156	0,2028	0,0100
0,166	0,0547	0,0020
0,176	0,0360	0,0000
0,186	0,0033	0,0000

Таблица 7

Результаты моделирования при изменении исходной температуры при давлении 300 КПа

Объемный расход	Исходная температура 351,6 К	Исходная температура 293 К
0,126	26,5269	25,2090
0,136	26,2777	24,9742
0,146	25,9869	24,4105
0,156	25,6788	1,1110
0,166	25,3345	0,3684
0,176	24,1703	0,1106
0,186	0,8565	0,0130

Таким образом, температура, так же как и давление, является одним из важнейших информационных параметров для диагностики режимов работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВЯЗКОСТИ

В литературе, посвященной нестационарным процессам о влиянии вязкости жидкости на величину кавитационного запаса, имеется малое количество информации. Вязкость зависит от температуры и давления, но программная среда позволяет определить отдельно влияние изменения вязкости на режим работы насосного комплекса.

Для моделирования было положено, что жидкость остается маловязкой ($\eta < 0,1$) и принято значение динамической вязкости $\eta = 0,007 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Результаты указаны в табл. 8.

При увеличении динамической вязкости наблюдается некоторое уменьшение кавитационного объема, но результаты моделирования не отличаются также значительно, как результаты моделирования при изменении давления и температуры.

Таблица 8

Результаты моделирования при изменении динамической вязкости при давлении 400 КПа

Объемный расход	Динамическая вязкость 0,007 Па·с	Динамическая вязкость 0,001 Па·с
0,126	0,0079	0,0091
0,136	0,0035	0,0041
0,146	0,0007	0,0010
0,156	0,0000	0,0000
0,166	0,0000	0,0000
0,176	0,0000	0,0000
0,186	0,0000	0,0000

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Применение частотного регулятора для изменения частоты вращения насоса является одним из самых распространенных методов регулирования режима работы насосного комплекса.

При моделировании было произведено уменьшение и увеличение частоты вращения и сравнение с результатами, полученными при исходной частоте вращения.

Результаты моделирования представлены в табл. 9, 10.

Таблица 9

Результаты моделирования при изменении частоты вращения при давлении 400 КПа

Объемный расход	Частота вращения 1593 об/мин	Частота вращения 1947 об/мин	Частота вращения 1770 об/мин
0,126	0	24,1905	0,0091
0,136		8,6942	0,0041
0,146		0,6425	0,0010
0,156		0,3396	0,0000
0,166		0,1564	0,0000
0,176		0,0401	0,0000
0,186		0,0077	0,0000

Таблица 10

Результаты моделирования при изменении частоты вращения при давлении 300 КПа

Объемный расход	Частота вращения 1593 об/мин	Частота вращения 1947 об/мин	Частота вращения 1770 об/мин
0,126	0,0163	27,1401	25,2090
0,136	0,0051	26,9447	24,9742
0,146	0,0005	26,7342	24,4105
0,156	0,0000	26,4697	1,1110
0,166	0,0000	26,1625	0,3684
0,176	0,0000	25,8486	0,1106
0,186	0,0000	25,539	0,0130

Анализ результатов моделирования при изменении частоты вращения показал, что частота вращения также является важным информационным параметром, при этом границы ее изменения находятся в узких пределах.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПЛОТНОСТИ

Плотность жидкости является одним из ключевых физических параметров, влияющих на ее свойства.

Для моделирования было принято значение плотности равное 1100 кг/м^3 . Результаты представлены в табл. 11, 12.

Таблица 11

Результаты моделирования при изменении исходной плотности при давлении 400 КПа

Объемный расход	Исходная плотность 1100 кг/м^3	Исходная плотность $998,2 \text{ кг/м}^3$
0,126	0,0940	0,0091
0,136	0,0406	0,0041
0,146	0,0136	0,0010
0,156	0,0042	0,0000
0,166	0,0004	0,0000
0,176	0,0000	0,0000
0,186	0,0000	0,0000

Таблица 12

Результаты моделирования при изменении исходной плотности при давлении 300 КПа

Объемный расход	Исходная плотность 1100 кг/м^3	Исходная плотность $998,2 \text{ кг/м}^3$
0,126	26,0244	25,2090
0,136	25,7873	24,9742
0,146	25,5391	24,4105
0,156	25,2388	1,1110
0,166	24,4338	0,3684
0,176	0,9688	0,1106
0,186	0,3190	0,0130

Результаты моделирования при изменении исходной плотности свидетельствуют о том, что плотность является важнейшим информационным параметром, который необходимо учитывать при диагностике НК.

ДИАГНОСТИКА И ВЫБОР РЕЖИМА УПРАВЛЕНИЯ НК

В результате численного моделирования процессов в центробежном насосе было определено, что информационные парамет-

ры влияют на величину кавитационного объема в различной мере.

Для примера представим в виде поверхности зависимость кавитационного объема от давления и объемного расхода (рис. 5). Эти информационные параметры демонстрируют наличие областей как с высоким кавитационным объемом, так и с низким кавитационным объемом.

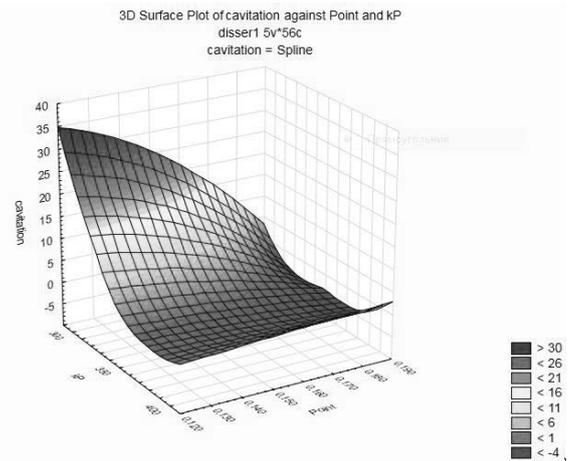


Рис. 5. Вывод объема кавитации в виде поверхности

В то же время такой способ представления является наглядным, но относительно неудобным при использовании в системе принятия решений. Для выбора стратегии управления удобнее использовать значения, сведенные в диаграмму (рис. 6), которая представляет собой срез при одинаковой скорости, частоте вращения и т.д.

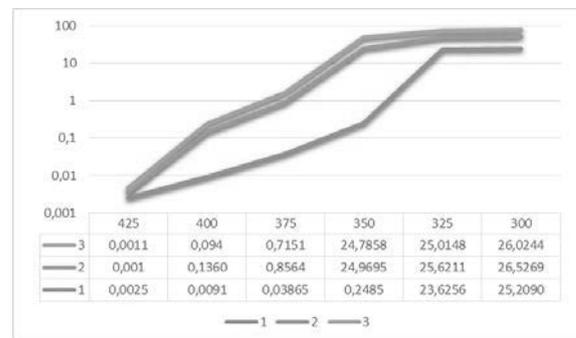


Рис. 6. Прецедентная диаграмма:
ряд 1 – без изменений; ряд 2 – при температуре $351,6 \text{ K}$; ряд 3 – при плотности 1100 кг/м^3

Для того чтобы определить отсутствие нестационарного процесса, необходимо провести границу 1% и 3% величины разга-

зирования жидкости. На практике достаточно сложно зарегистрировать начало кавитационного процесса, поэтому работа в области от 1% до 3% является нежелательной, но допустимой.

Как видно из диаграммы, одинаковые значения кавитационного объема для набора кривых, зависящих от информационных параметров, имеют различные значения исходного давления. Для удобства предлагается производить выбор прецедента, находящегося на пересечении исходного давления и кавитационного объема, значения которых откладываются на осях прецедентной диаграммы.

Управление по прецедентам отличается тем, что характеристика текущего режима и предлагаемые решения уже содержатся в базе знаний или дополняют ее в процессе работы.

Прецедент устанавливает взаимосвязь между информативными параметрами режима работы насосного комплекса и различными характеристиками, в том числе:

- кавитационная характеристика – определяет величину образования газовых пузырьков;
- напорно-расходная характеристика – определяет рабочую точку.

Управление по прецедентам предполагает использование математической модели режима работы насосного комплекса [7], на которой прецедент проверяется.

Критерий проверки прецедента выглядит следующим образом [7]:

$$I = I_1 + I_2,$$

где I_1 – площадь под фигурой, соответствующей отрицательным значениям рассогласования, I_2 – соответственно положительным его значениям:

$$I_1 = \int_0^{t_0} |P_{\text{вх}}(t) - P_{\text{кав}}(t)| dt;$$

$$I_2 = \int_{t_0}^{t_{\text{max}}} |P_{\text{вх}}(t) - P_{\text{кав}}(t)| dt.$$

Чем меньше значение интегрального критерия I , тем более оцениваемый прецедент является подходящим при выборе вариантов управления НК в системе поддержки принятия решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование нестационарных режимов работы насосного оборудования в программных пакетах Turbomachinery CFD и CFTurbo позволяет определить величину образования свободного газа в процессе работы центробежного насоса. Это позволяет определить значимость информационных параметров, их значения и рабочую точку насосного комплекса.

Для выбора безкавитационного режима управления необходимо сравнить величину предрасположенности к кавитации у текущего и предлагаемого режима работы НК. Сравнение производится с помощью интегрального критерия. Затем из предлагаемых режимов выбирается наиболее близкий с наименьшим значением интегрального критерия.

Использование предложенного подхода в автоматизированной системе поддержки принятия решений при управлении НК позволяет обеспечить безкавитационные режимы его работы в условиях нестационарности внешних и внутренних факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новоженин М. Б., Лютов А. Г., Озеров М. Ю. Экспериментальное исследование режимов работы автоматизированного насосного комплекса при нестационарных процессах // Вестник ЮУрГУ. 2018. Т. 18, № 1. С. 110–116. [М. В. Novozhenin, A. G. Lutov, M. J. Ozerov, "Experimental study of the operation modes of the automated pumping complex for nonstationary processes" (in Russian), in *Vestnik JuUrGU*, vol. 18, no.1, pp. 110-116, 2018.]
2. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы: учебник / Т. М. Башта и др. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1982. 423 с. [Т. М. Bashta et al., *Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1982.]
3. Джарратано Дж., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. 4-е изд./ пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. 1152 с. [J. Jarratano, G. Riley, *Expert systems: principles of development and programming*. Moscow: ООО «И.Д. Vil'yams», 2007.]
4. CFTurbo. Manual, CFTurbo GmbH, 2016 (дата обращения: 12.03.2018) URL: <https://en.cfturbo.com/fileadmin/content/manual/en/index.html?contact.html> [CFTurbo. (2018, Mar. 12) [Online]. Available: <https://en.cfturbo.com/fileadmin/content/manual/en/index.html?contact.html>]
5. TCFD 17.10 - Manual., CFD support s.r.o., 2017 (дата обращения: 12.03.2018) URL: <https://www.cfdsupport.com/download/TCFD-manual-v17.10.pdf> [TCFD (2018, Mar. 12) [Online]. Available: <https://www.cfdsupport.com/download/TCFD-manual-v17.10.pdf>]

6. S.C. Li, Cavitation of Hydraulic Machinery. Imperial College Press, 2000, P. 464 [S. C. Li, *Cavitation of hydraulic equipment*, Imperial College Press, 2000.]

7. Лютов А. Г., Новоженин М. Б., Хуснутдинов Д.З. Метод диагностики насосного комплекса на основе моделирования режимов работы в условиях возникновения кавитации // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 1. С. 160–164. [A. G. Lutov, M. B. Novozhenin, D. Z. Khusnutdinov, "The method of diagnostics of a pumping complex on the basis of modeling of operating modes in the conditions of occurrence of cavitation" (in Russian), in *Neftegazovoe delo*, vol. 15, no. 1, pp. 160-164, 2017.]

ОБ АВТОРАХ

ЛЮТОВ Алексей Германович, зав. каф. автоматизации технологических процессов. Дипл. инж. электрон. техн. (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. информ. (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. управления слож. техн. объектами.

НОВОЖЕНИН Максим Борисович, асп. каф. автоматизации технологических процессов. Дипл. инженер (УГАТУ, 2011). Готовит дисс. о диагностике и управлении центробежным насосом в условиях возникновения кавитации.

METADATA

Title: Modeling and diagnostics of non-stationary regimes automated pumping complexes

Authors: A.G. Lutov¹, M.B. Novozhenin²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹lutov1@mail.ru, ²novozhenin.maxim@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 1 (79), pp. 113-120, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The problems of computer modeling and diagnostics of pumping complexes for automation of the process of providing uncivilized operating modes are considered. The urgency of the need to solve this problem is due to the fact that during operation of pumping complexes, a change in the operating mode often occurs due to the action of various disturbing factors, which often leads to cavitation and, as a result, to a decrease in efficiency and destruction of the pump complex elements. Simulation of non-stationary modes is performed using Turbomachinery CFD and CFTurbo software packages. The use of the proposed model in the decision support system for the control of the pump complex makes it possible to provide uncivilized operation modes in conditions of unsteadiness of external and internal factors.

Key words: pump complex; non-stationary modes; cavitation; centrifugal pump; numerical simulation; mode diagnostics; mode control; precedent.

About authors:

LUTOV, Alexey Germanovich, Prof. Head of Dept. of Automation of Technological Processes, Dipl. Electronics Engineer (USATU, 1985). Dr. of Thec. Sci. (UGATU, 2005).

NOVOZHENIN, Maxim Borisovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Automation of Technological Processes, Dipl. Engineer of Automation of Technological Processes (UGATU, 2011).