

А. Г. Лютов, д-р техн. наук, проф., lutov1@mail.ru,  
М. Б. Новоженин, ст. преподаватель, novozhenin.maxim@yandex.ru,  
Уфимский государственный авиационный технический университет

## Методология автоматизированного контроля и управления режимами работы насосного комплекса в условиях возникновения кавитации

*Представлены результаты решения проблемы повышения эффективности работы автоматизированного насосного комплекса для перекачивания жидкостей в условиях нестационарных гидравлических процессов, таких как кавитация. Трудность определения условий возникновения кавитации связана с большим числом параметров, взаимосвязью которых сложно определить. Показано, что используемые на практике в указанных условиях способы контроля и управления насосными комплексами на основе центробежных насосов и прилегающих к ним трубопроводов обладают существенными недостатками или решают проблему лишь частично. Представлена математическая модель работы насосного комплекса для оперативного контроля параметров кавитационных режимов на основе подбора режимов работы центробежного насоса и перемещения поршня по трубопроводу, что позволяет упростить процедуру определения наличия кавитации. Предложен критерий определения эффективности режима работы насосного комплекса на основе интегральной оценки разницы экспериментальных и модельных данных. Сформирована методология управления режимами работы насосного комплекса в условиях возникновения кавитации. Ввиду сложности прямого расчета объема кавитации предложена нейросетевая модель, обучаемая на основе экспериментальных данных. Разработаны структура, алгоритмы и программное обеспечение автоматизированной системы контроля и управления с использованием нейросетевых моделей и прецедентного подхода для оперативного определения условий возникновения кавитации и коррекции режимов работы насосного комплекса. Решения, основанные на рассуждении по прецедентам, предлагаются оператору в виде пары "управляющее воздействие — ожидаемый результат". Практическая реализация автоматизированной системы контроля и управления режимами работы насосного комплекса выполнена в пакете AppDesigner математического пакета MATLAB. Использование разработанной автоматизированной системы контроля и управления обеспечивает повышение (восстановление) производительности насосного комплекса в условиях возникновения кавитации, предотвращает разрушение его элементов, увеличивает срок службы, снижает эксплуатационные издержки и затраты на ремонт оборудования.*

**Ключевые слова:** насосный комплекс, кавитация, контроль и управление, методы и алгоритмы, автоматизированная система, нейросетевая модель, прецедентный подход, программно-алгоритмический комплекс

### Введение

Технологические процессы перекачивания жидкостей широко используются в различных отраслях промышленности — в коммунальном хозяйстве, водоснабжении и водоотведении, при транспортировке нефтепродуктов и т. д. Для этого обычно применяются насосные комплексы (НК), под которыми подразумеваются один или несколько насосов с прилегающими к ним трубопроводами. Наибольшее распространение получили НК на основе центробежных насосов в силу их значительной производительности, высокого КПД и удобства в эксплуатации [1].

В процессе функционирования НК может возникнуть кавитация. Она имеет место при локальном снижении давления в центробежном насосе или трубопроводе до давления на-

сыщенных паров с последующим схлопыванием образующихся полостей, заполненных газом или паром. Эти явления приводят к эрозии рабочих органов центробежного насоса, шумам, вибрации и пульсациям давления в системе [2].

Кавитация представляет собой важную проблему в связи с трудностью контроля ее возникновения и последствий воздействия на НК — уменьшения производительности (на 20...30 % от номинального значения), снижения КПД, повышения износа и разрушение элементов, уменьшения срока службы оборудования. Кавитационный режим выражает различную меру кавитации в зависимости от присутствующих условий ее возникновения.

Традиционными способами устранения кавитации в настоящее время являются изменения в конструкции НК, ручное и механизированное управление режимами их работы [3].

В то же время сложность автоматизированного оперативного контроля и управления режимами работы в условиях возникновения кавитации в НК в реальном времени обусловлена отсутствием соответствующих эффективных автоматизированных методов и средств. Используемые на практике способы контроля и управления НК в указанных условиях обладают существенными недостатками или решают проблему лишь частично.

В связи с этим научные исследования, направленные на разработку эффективных методов и средств автоматизированного оперативного контроля и управления НК при перекачивании жидкости в условиях возникновения кавитации, являются актуальными.

### **Состояние вопроса**

Анализ причин возникновения кавитации в центробежных насосах показал, что основными причинами возникновения и последующего развития кавитации являются следующие факторы: загрязнение жидкости, образующее ядра кавитации и определяющее их число (содержание в жидкости газов, наличие примесей); физические свойства жидкости (температура, плотность жидкости); гидродинамические характеристики потока.

Мерой количественной оценки кавитации является кавитационный запас — действительная высота всасывания центробежного насоса, при которой не возникает испарение перекачиваемой жидкости в точке минимально возможного давления жидкости в центробежном насосе. Интерес представляет зависимость изменения кавитационной характеристики центробежного насоса от изменения подачи, которая является нелинейной и многофакторной: давление жидкости на входе в центробежный насос, скорость течения жидкости в центробежном насосе, изменение плотности и давления насыщенных паров перекачиваемой жидкости, которые зависят от температуры, газосодержания, наличия примесей и т. д.

В числе основных методов контроля кавитации в НК можно выделить группы акустических и вибрационных методов и метод контроля фиксации мгновенных пульсаций давления, а среди методов управления — конструкционные и физические методы устранения.

Анализ показал, что одним из действенных методов контроля кавитации в трубопроводе в производственных условиях является метод фиксации мгновенных пульсаций давления, однако для применения данного метода в производственных условиях необходимо наличие дополнительных технических средств контроля режимов работы НК.

Физические методы устранения кавитации обладают значительным разнообразием, и применение современных средств автоматизации способствует устранению недостатков, связанных с трудоемкостью и инертностью методов.

Таким образом, анализ существующих методов контроля и управления режимами работы НК в условиях возникновения кавитации показывает, что в настоящее время, несмотря на большое разнообразие подходов к данному вопросу, нет эффективных способов управления процессом развития кавитации. Сложность создания средств контроля и управления режимами работы НК заключается в отсутствии необходимой математической модели (ММ) для оперативного контроля параметров кавитационных режимов, критерия определения эффективности режима работы и методологии формирования стратегии управления режимами работы НК.

### **Автоматизированная подсистема контроля режима работы насосного комплекса при перекачивании жидкости**

В работе [4] представлены результаты разработки ММ процесса перекачивания жидкости, описывающей НК на основе подобия центробежного насоса поршневому насосу, что позволяет упростить процедуру определения наличия кавитации в оперативном режиме.

Предложенная ММ процесса перекачивания жидкости отличается от известных [5–12] тем, что описание процессов, происходящих при вращении рабочего колеса центробежного насоса заменено на аналогичное при линейном перемещении поршня по трубопроводу (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Такое допущение позволило существенно упростить расчет информативных параметров режима работы центробежного насоса по ММ процесса перекачивания жидкости.

Предлагаемая ММ процесса перекачивания жидкости выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = \frac{1}{m_1} (N\beta_{Vx1} - k_{тр}V_x k\beta_{Vx2}); \\ \frac{dQ_H}{dt} = \frac{1}{m_{Г1}} (p_{нп}S\beta_{Qн1} - \mu_{тр1}Q_H\beta_{Qн2} - \\ - k_1p_{нп}\beta_{Qн3} - Q_H\beta_{Qн4}); \\ \frac{dQ_B}{dt} = \frac{1}{m_{Г2}} (p_{вп}S\beta_{Qв1} - \mu_{тр2}Q_B\beta_{Qв2} - \\ - k_1p_{вп}\beta_{Qв3} - Q_B\beta_{Qв4}); \\ \frac{dp_{нп}}{dt} = \frac{E}{V_H} (V_xSk_2\beta_{рнп1} - Q_H\beta_{рнп2} - \\ - \alpha\beta_{рнп3}(p_{нп} - p_{вп}) - p_{нп}\beta_{рнп4} + p_{атм}\beta_{рнп5}); \\ \frac{dp_{вп}}{dt} = \frac{E}{V_B} (-V_xSk_2\beta_{рвп1} + 2Q_B\beta_{рвп2} - \\ - \alpha\beta_{рвп3}(p_{нп} - p_{вп}) - k_3p_{вп}\beta_{рвп4} + p_{атм}\beta_{рвп5}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $V_x$  — скорость движения поршня;  $m_1$  — масса поршня;  $k_{тр}$  — коэффициент трения;  $n$  — скорость вращения центробежного насоса;  $k$  — коэффициент перерасчета трения в центробежном насосе для расчета трения в поршневом насосе;  $p_{нп}$  — давление жидкости в нагнетательной полости трубопровода;  $Q_H$  — подача жидкости;  $m_{Г1}$  — масса жидкости в нагнетательной полости;  $\mu_{тр1}$  — коэффициент гидравлического трения в нагнетательной полости;  $p_{вп}$  — давление жидкости во всасывающей полости трубопровода;  $Q_B$  — подача жидкости;  $m_{Г2}$  — масса жидкости во всасываемой полости;  $\mu_{тр2}$  — коэффициент гидравлического трения во всасываемой полости;  $S$  — площадь трубопровода;  $V_H, V_B$  — объем трубопровода в нагнетательной и во всасываемой полостях;  $E$  — модуль упругости сжатия жидкости;  $\alpha$  — коэффициент, пропорциональный положению задвижки линии байпаса;  $k_1$  — коэффициент обратной связи по расходу для давления;  $k_2$  — коэффициент обратной связи по давлению для скорости;  $k_3$  — коэффициент обратной связи по давлению для давления;  $p_{атм}$  — атмосферное давление;  $\beta_{Vxi}, \beta_{Qни}, \beta_{Qви}, \beta_{рнпi}, \beta_{рвпi}$  — коэффициенты размерности для  $i$ -го слагаемого уравнений  $V_x, Q_H, Q_B, p_{нп}, p_{вп}$ .

Таким образом, ММ процесса перекачивания жидкости представлена нелинейной нестационарной системой уравнений 4-го порядка.

### Типовые режимы работы НК

Если выделить совокупность рабочих режимов как первый класс, а кавитационные режимы — как второй, то для определения нали-

чия условий возникновения кавитации в НК предложен критерий [4], который рассчитывается по разнице значений давления на входе, найденных с помощью ММ процесса перекачивания жидкости, и средним фиксируемым фактическим значением в заданном интервале времени  $t_0, \dots, t_1$ :

$$I = \int_{t_0}^{t_1} |P_M(t) - P_{НК}(t)| dt, \quad (2)$$

где  $P_M(t)$  — давление на входе, полученное по результатам расчетов математической модели;  $P_{НК}(t)$  — среднее фиксируемое фактическое значение давления, измеренное на входе насосного комплекса.

Критерий используется в дальнейшем для настройки (идентификации) ММ процесса перекачивания жидкости и определения наличия условий возникновения кавитации. Проверка адекватности полученных зависимостей проводилась с использованием известных методов математической статистики.

Для определения влияния различных факторов на наличие кавитационных режимов выполнено численное моделирование условий возникновения кавитации [13].

Построение твердотельной модели течения жидкости в центробежном насосе проведено в САПР *CFTurbo* по заданным геометрическим параметрам и эксплуатационным требованиям. Анализ режимов работы конкретного НК выполнен с помощью трехмерной модели течения жидкости в центробежном насосе в программной среде конечно-элементного анализа *Turbomachinery CFD* (рис. 2, см. вторую сторону обложки). В результате были получены зависимости значений объема кавитации (объема свободного газа) от действующих на НК факторов. Исходными данными при анализе являются характеристики среды, такие как вид жидкости, ее вязкость, плотность, исходные температура и давление, скорость вращения рабочего колеса, модель турбулентности и т. д.

Проведенная оценка корреляции значений объема кавитации и действующих на НК факторов позволила выбрать значимо действующие на изменение объема кавитации параметры: динамическую вязкость, плотность, давление, температуру, скорость вращения рабочего колеса.

Зависимость объема кавитации от каждого из значимых параметров наглядно может быть представлена в виде набора поверхности — семейства

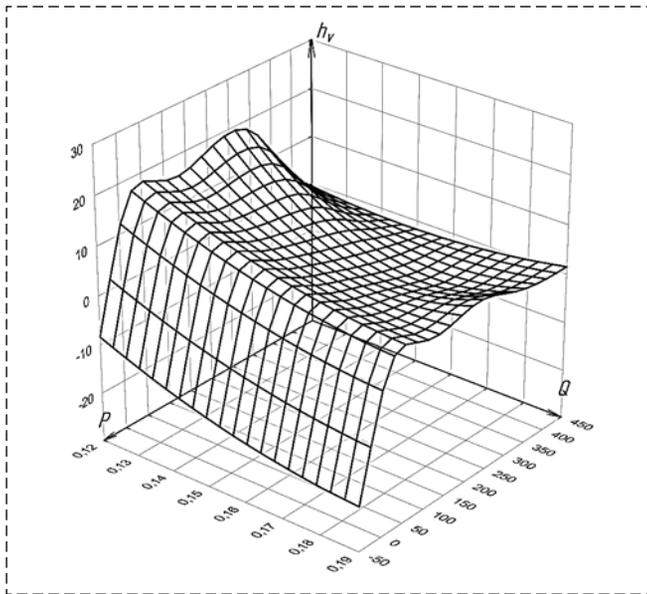


Рис. 3. Поверхность значений объема кавитации как функция сочетания уровней значимых параметров

Fig. 3. Surface of values of cavitation volume as a function of a combination of levels of significant parameters

точек с фиксированными значениями параметров (рис. 3). Данная поверхность позволяет получить зависимости объема кавитации от каждого из значимых параметров при постоянстве значений других параметров для последующего анализа (рис. 4, см. вторую сторону обложки).

Данные прецедентных диаграмм (рис. 4) позволяют определить удаленность текущего прецедента от желаемого значения производительности НК (рис. 5, см. третью сторону обложки).

Прецедентная диаграмма является результатом численного моделирования методом конечных элементов в программе *Turbomachinery CFD* течения жидкости в центробежном насосе. Динамика течения жидкости моделируется точно, в качестве рационального числа число точек было выбрано число 7.

В качестве примера приведены результаты исследования зависимости изменения объема кавитации (объема высвобождаемого газа в процессе работы НК) при изменении точечного расхода и исходного давления.

В итоге имеет место набор прецедентных диаграмм, при исходных значениях давления от 425 до 300 кПа с шагом 25 кПа, представленный на рис. 6 (см. третью сторону обложки).

Представленные графические зависимости отражают то обстоятельство, что кавитационная характеристика имеет существенно нелинейный характер. Для аппроксимации полученных результатов и создания базы данных

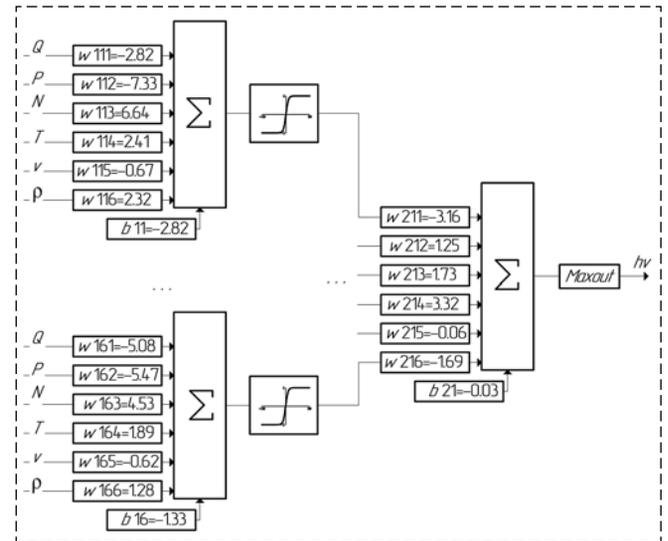


Рис. 7. Фрагмент структуры нейронной сети

Fig. 7. Fragment of the structure of the ANN

прецедентных диаграмм целесообразно воспользоваться нейросетевым инструментарием.

Фрагмент структуры нейронной сети с весами нейронов предпочтительного варианта представлен на рис. 7.

Результаты настройки весов НС определяют тип *MLP 6-6-1* (6 нейронов во входном слое — 6 нейронов во внутреннем слое — 1 выходной нейрон) как предпочтительный вариант.

### Автоматизированная система управления насосным комплексом при перекачивании жидкости

Рассмотрена методология управления НК в условиях возникновения кавитации и создание алгоритмических и программных средств автоматизированной системы контроля и управления (АСКиУ) НК с применением прецедентного подхода.

Рабочая точка (сочетание режимных характеристик) НК, находящаяся на пересечении напорно-расходных характеристик центробежного насоса и сети, обладает индивидуальными кавитационным запасом и объемом кавитации. Управляющее воздействие приводит к изменению режима работы НК и, как следствие, к изменению напорно-расходной характеристики. При этом выбор напорно-расходной характеристики проводится таким образом, чтобы обеспечить отсутствие кавитации и необходимый уровень КПД.

Структурная схема АСКиУ НК представлена на рис. 8. Основными функциями данной системы являются: контроль наличия кавита-

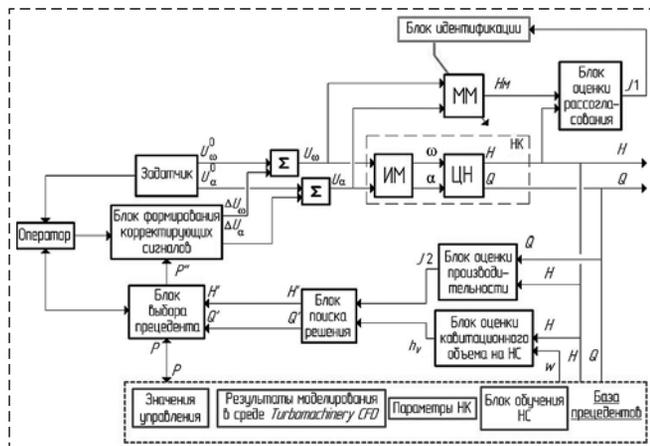


Рис. 8. Структурная схема АСКиУ режимами работы НК  
 Fig. 8. Structural scheme of ACaMS modes of operation of PC

ции, контроль значения производительности и выбор управляющего воздействия с помощью базы прецедентов [14, 15].

Для управления НК разработан алгоритм АСКиУ режимом его работы, отличающийся от рассмотренного в работе [16] тем, что в качестве средств контроля условий возникновения кавитации в НК используется предложенная выше ММ процесса перекачивания жидкости, на которой отрабатывается потенциальное управляющее воздействие.

Задатчик системы формирует два вида управляющих воздействий — круговую частоту вращения рабочего колеса центробежного насоса  $U_{\omega}^0$  и положение (угол открытия) задвижки на перепускном канале НК (байпаса)  $U_{\alpha}^0$ .

Блок идентификации проводит настройку ММ процесса перекачивания жидкости по значению рассогласования  $J_1$  между напором  $H$ , измеренным с НК, и напором  $H_m$ , рассчитанным с помощью ММ процесса перекачивания жидкости. Идентификация выполняется с помощью подачи тестовых управляющих воздействий  $U_{\omega}$  и  $U_{\alpha}$  на ММ процесса перекачивания жидкости и НК.

Блок определения кавитационного объема с помощью нейронной сети определяет значение объема кавитации  $h_v$  для используемого режима работы на основе весов  $w$  из базы прецедентов. Блок оценки производительности с помощью критерия оценки определяет отклонение производительности НК  $J_2$  от заданной.

Блок поиска решения с помощью алгоритма Хука—Дживса формирует набор подходящих прецедентов  $P = \{H', Q'\}$ , используя значения критерия оценки производительности  $J_2$  и объема кавитации  $h_v$ .

Блок выбора прецедента проводит проверку предлагаемых прецедентов  $P$  на ММ процесса перекачивания жидкости, формирует заключения об их пригодности  $P''$ .

Блок формирования корректирующих сигналов предлагает отобранные воздействия оператору для последующего принятия решения о коррекции управления  $\{\Delta U_{\omega}, \Delta U_{\alpha}\}$  НК.

База прецедентов, сформированная в режиме off-line, состоит из результатов моделирования в среде *Turbomachinery CFD* (см. рис. 5 на третьей стороне обложки): возможных значений управляющих воздействий с учетом ограничений, статических и динамических параметров и характеристик НК, настройки весов нейронной сети.

Прерывания в системе реализованы по времени и по инициативе оператора. Разработана *use-case* диаграмма, иллюстрирующая разделение ролей оператора и АСКиУ НК в условиях возникновения кавитации.

### Программная реализация автоматизированной системы контроля и управления

Программное обеспечение АСКиУ НК разработано с применением инструмента *App Designer* математического пакета MATLAB [17]. Интерфейс данного программного обеспечения представляет собой вкладки, на которых представлены результаты моделирования и вывод прецедента (рис. 9).

Численные имитационные и натурные эксперименты [18] с использованием разработанного программного обеспечения АСКиУ НК показали возможность обеспечить повышение производительности НК на 20...30 % за счет восстановления ее до заданного значения в условиях негативного действия кавитации.

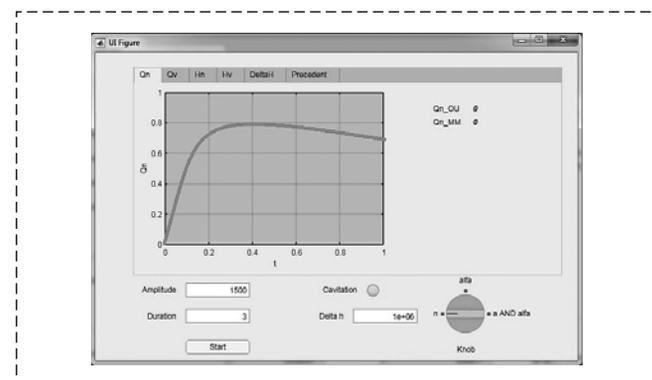


Рис. 9. Вкладка для отображения изменений расхода  
 Fig. 9. Tab to display flow changes

## Заключение

Оперативный учет ключевых факторов, влияющих на развитие кавитации, реализованный в предлагаемой математической модели, и предложенный критерий оценки режима работы НК позволяют упростить процедуру определения наличия кавитации в НК.

Прецедентный подход, реализованный в автоматизированной системе, использующей математическую и твердотельную модели НК и нейросетевую модель определения объема кавитации, позволяет определять степень пригодности потенциального управляющего воздействия, за счет чего оператору предлагается совокупность возможных в текущей ситуации управляющих воздействий и предполагаемых результатов.

Представленная методология построения автоматизированной системы контроля и управления обеспечивает повышение (восстановление) производительности НК в условиях возникновения кавитации, предотвращает разрушение его элементов, увеличивает срок службы, снижает эксплуатационные издержки и затраты на ремонт оборудования.

## Список литературы

1. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
2. Карелин В. Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. М.: Машиностроение, 1975. 336 с.
3. Тагирова К. Ф., Нугаев И. Ф. Концептуальные основы автоматизации управления установками электроцентробежных насосов нефтедобывающих скважин // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 2. С. 102—109. URL: <https://doi.org/10.17587/mau.21.102-109>.
4. 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.
5. Tang X., Zou M., Wang F., Li X., Shi X. Comprehensive numerical investigations of unsteady internal flows and cavitation characteristics in double-suction centrifugal pump // Mathematical Problems in Engineering. 2017. P. 1—13. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/5013826>.

6. Nohmi M., Yamazaki S., Kagawa S., An B., Kang D. et al. Numerical analyses for cavitation surge in a pump with the square root shaped suction performance curve // 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. 2016. P. 1—8.

7. Hieninger T., Goppelt F., Schmidt-Vollus R. et al. Energy-saving potential for centrifugal pump storage operation using optimized control schemes // Energy Efficiency. 2021. P. 9—23. URL: <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09932-5>.

8. Lu J, Yuan S, Parameswaran S, Yuan J, Ren X, Si Q. Investigation on the vibration and flow instabilities induced by cavitation in a centrifugal pump // Advances in Mechanical Engineering. 2017. Vol. 9, N. 4. P. 1—11. doi: 10.1177/1687814017696225.

9. Goppelt F., Hieninger T., Schmidt-Vollus R. Modeling centrifugal pump systems from a system-theoretical point of view // 18th International Conference on Mechatronics — Mechatronika (ME). 2018. P. 1—8.

10. Liu H.-L., Liu D.-X., Wang Y., Wu X.-F., Wang J. Application of modified k- $\omega$  model to predicting cavitating flow in centrifugal pump // Water Science and Engineering. 2013. Vol. 6, N. 3. P. 331—339. doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2013.03.009.

11. Сагдатуллин А. М. Разработка математической модели автоматизированного электромеханического комплекса насосной станции // Математическое моделирование. 2015. Т. 27, № 4. С. 3—15.

12. Сердюк А. А., Коренькова Т. В. Характеристики физической модели насосного комплекса с учетом кавитационных процессов // ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ І ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ СИСТЕМИ. 2012. № 4(20). С. 57—62.

13. Лютов А. Г., Новоженин М. Б. Моделирование и диагностика нестационарных режимов автоматизированных насосных комплексов // Вестник УГАТУ. 2018. Т.22, № 1. С. 113—120.

14. Лютов А. Г., Новоженин М. Б. Автоматизированная система диагностики и управления режимами работы насосного комплекса при нестационарных процессах // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22, № 3. С. 114—123.

15. Лютов А. Г., Рябов Ю. В. Синтез технологического процесса для роботизированного комплекса на основе знаний // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017;18(10):660-664. URL: <https://doi.org/10.17587/mau.18.660-664>.

16. Южанин В. В., Барашкин Р. Л. Централизованная система автоматического регулирования магистрального нефтепровода с прогнозирующей моделью // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. 2015. № 1. С. 150—154.

17. Лютов А. Г., Новоженин М. Б., Новоженин И. Б. Программа контроля и управления насосным комплексом // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019664367 от 06.11.2019.

18. 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.

## Methodology of Automated Monitoring and Control of Pump Complex Operation Modes in Conditions of Cavitation Occurrence

A. G. Lutov, [lutov1@mail.ru](mailto:lutov1@mail.ru), M. B. Novozhenin, [novozhenin.maxim@yandex.ru](mailto:novozhenin.maxim@yandex.ru),  
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450000, Russian Federation

Corresponding author: Novozhenin M. B., Senior Lecturer, Ufa State Aviation Technical University,  
Ufa, 450000, Russian Federation, e-mail: [novozhenin.maxim@yandex.ru](mailto:novozhenin.maxim@yandex.ru)

Accepted on June 21, 2021

## Abstract

The results of solving the problem of increasing the efficiency of an automated pumping complex for pumping liquids in conditions of non-stationary hydraulic processes, such as cavitation, are presented. The difficulty of determining the conditions for the occurrence of cavitation is associated with a large number of parameters, the mutual correlation of which is difficult to determine. It is shown that the methods used in practice in these conditions for monitoring and controlling pumping complexes based on centrifugal pumps and adjacent pipelines have significant disadvantages or solve the problem only partially. A mathematical model of the pump complex operation for operational control of the parameters of cavitation modes based on the similarity of the modes of operation of the centrifugal pump and the movement of the piston through the pipeline is presented, which simplifies the procedure for determining the presence of cavitation. A criterion for determining the efficiency of the pump complex operation mode is proposed based on an integral assessment of the difference between experimental and model data. A methodology for controlling the modes of operation of the pumping complex in the conditions of cavitation is formed. Due to the complexity of the direct calculation of the cavitation volume, a neural network model was proposed, trained based on experimental data. The structure, algorithms and software of the automated control and control system are developed using neural network models and a case-based approach to quickly determine the conditions for the occurrence of cavitation and correct the operating modes of the pumping complex. Decisions based on case — based reasoning are offered to the operator in the form of a "control effect-expected result" pair. The practical implementation of the automated system for monitoring and controlling the operating modes of the pumping complex is carried out in the AppDesigner package of the Matlab mathematical package. The use of the developed automated monitoring and control system provides an increase (restoration) of the pump complex performance in the conditions of cavitation, prevents the destruction of its elements, increases the service life, reduces operating costs and equipment repair costs.

**Keywords:** pump complex, cavitation, control and management, methods and algorithms, automated system, neural network model, use case approach, software and algorithmic complex

For citation:

Lutov A. G., Novozhenin M. B. Methodology of Automated Monitoring and Control of Pump Complex Operation Modes in Conditions of Cavitation Occurrence, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 9, pp. 468—474.

DOI: 10.17587/mau.22.468-474

## References

1. Leznov B. S. Energy saving and adjustable drive in pumping and blowing plants, Moscow, Energoatomizdat, 2006, 360 p. (in Russian).
2. Karelin V. Ya. Cavitation phenomena in centrifugal and axial pumps, Moscow, Mashinostroenie, 1975, 336 p. (in Russian).
3. Tagirova K. F., Nugayev I. F. Conceptual bases of automation of control of installations of electric center-bearing pumps of oil-producing wells. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 102—109 (in Russian), available at: <https://doi.org/10.17587/mau.21.102-109>.
4. Lutov A. G., Novozhenin M. B., Khusnutdinov D. Z. The method of diagnostics of a pumping complex on the basis of modeling of operating modes in the conditions of occurrence of cavitation, *Neftegazovoe Delo*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 160—164 (in Russian).
5. Tang X., Zou M., Wang F., Li X., Shi X. Comprehensive numerical investigations of unsteady internal flows and cavitation characteristics in double-suction centrifugal pump, *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, pp. 1—13, available at: <https://doi.org/10.1155/2017/5013826>.
6. Nohmi M., Yamazaki S., Kagawa S., An B., Kang D. et al. Numerical analyses for cavitation surge in a pump with the square root shaped suction performance curve, *16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, 2016, pp. 1—8.
7. Hieninger T., Goppelt F., Schmidt-Vollus R. et al. Energy-saving potential for centrifugal pump storage operation using optimized control schemes, *Energy Efficiency*, 2021, pp. 9—23, available at: <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09932-5>.
8. Lu J, Yuan S, Parameswaran S, Yuan J, Ren X, Si Q. Investigation on the vibration and flow instabilities induced by cavitation in a centrifugal pump, *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9, no. 4, pp. 1—11, doi:10.1177/1687814017696225.
9. Goppelt F., Hieninger T., Schmidt-Vollus R. Modeling centrifugal pump systems from a system-theoretical point of view, *18th International Conference on Mechatronics — Mechatronika (ME)*, 2018, pp. 1—8.
10. Liu H.-L., Liu D.-X., Wang Y., Wu X.-F., Wang J. Application of modified k- $\omega$  model to predicting cavitating flow in centrifugal pump, *Water Science and Engineering*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 331—339, doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2013.03.009.
11. Sagdatullin A. M. Development of a mathematical model of an automated electromechanical complex of a pumping station, *Matematicheskoe Modelirovanie*, 2015, vol. 27, no. 4, pp. 3—15 (in Russian).
12. Serdyuk A. A., Korenkova T. V. Characteristics of physical models of a pumping complex taking into account cavitation processes, *ELEKTROMECHANICHNI I ENERGOZBERIGAJUCHI SISTEMI*, 2012, no. 4(20), pp. 57—62 (in Russian).
13. Lutov A. G., Novozhenin M. B. Modeling and diagnostics of non-stationary modes of automated pumping systems, *Vestnik UGATU*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 113—120 (in Russian).
14. Lutov A. G., Novozhenin M. B. Automated system for diagnostics and control of pump complex operating modes during non-stationary processes, *Vestnik UGATU*, 2018, vol. 22, no. 3, pp. 114—123 (in Russian).
15. Lutov A. G., Ryabov Yu. V. Synthesis of a technological process for a robotic complex based on knowledge, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2017, vol. 18, no. 10, pp. 660—664 (in Russian), available at: <https://doi.org/10.17587/mau.18.660-664>.
16. Juzhanin V. V., Barashkin R. L. Centralized system for automatic regulation of the main oil pipeline with a predictive model, *Vserossijskaja Nauchnaja Konferencija po Problemam Upravlenija v Tehnicheskikh Sistemah*, 2015, no. 1, pp. 150—154 (in Russian).
17. Lutov A. G., Novozhenin M. B., Novozhenin I. B. The program of control and management of the pump complex, Computer Program no 2019664367, 2019.
18. Novozhenin M. B., Lutov A. G., Ozerov M. J. Experimental study of the operation modes of the automated pumping complex for nonstationary processes, *Vestnik JuUrGU*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 110—116 (in Russian).