

**В. Е. НИКОЛЬСКИЙ, О. Ю. ОЛЕЙНИК, А. В. ЛОБОДЕНКО**  
**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ**  
**ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ОБОГРЕВА ЗДАНИЙ**

Изготовлен усовершенствованный промышленный образец роторно-импульсного теплогенератора с измененной конструкцией кавитационной камеры для использования в химической отрасли. Дополнительно при интегрировании кавитационной камеры роторно-импульсного теплогенератора в тепловую систему была изменена конструкция теплообменника «труба в трубе» на пластинчатый.

Разработана автоматическая система контроля и управления тепловой системой с использованием многофункционального виброчастотного измерительного преобразователя для оценки эффективности процесса кавитации путем определения резонансной частоты колебаний среды. Значения расхода  $Q = 70\%$  соответствует максимальному эффекту интенсификации процесса кавитации. Проведенные пуско-наладочные работы позволили определить возможность применения разработанной автоматической системы с соответствующим программным обеспечением для контроля и управления работой тепловой системы.

Проведены стендовые исследования энергоэффективности работы тепловой системы. Определены показатели энергоэффективности системы с усовершенствованной кавитационной камерой теплогенератора. Выполнен сопоставительный анализ путем сравнения с аналогом, описанным в литературе. Доказано, что совершенствование тепловой системы позволило получить улучшенные показатели энергоэффективности. Установлено, что КПД усовершенствованной тепловой системы на основе усовершенствованной кавитационной камеры на 7 % выше.

Полученные данные сравнительного анализа позволяет рекомендовать разработанный роторно-импульсный теплогенератор в качестве достойной альтернативы используемым теплоагрегатам в тепловых системах отопления промышленных зданий и сооружений, цехах предприятий, получения горячей воды для нужд химической отрасли.

**Ключевые слова:** кавитационный теплогенератор, система контроля, роторно-импульсный аппарат, многофункциональный виброчастотный преобразователь.

**В. Є. НИКОЛЬСЬКИЙ, О. Ю. ОЛІЙНИК, А. В. ЛОБОДЕНКО**  
**РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ РОБОТИ ТЕПЛОВИХ СИСТЕМ ДЛЯ**  
**ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ОБІГРІВУ БУДІВЕЛЬ**

Виготовлений вдосконалений промисловий зразок роторно-імпульсного теплогенератора із зміненою конструкцією кавітаційної камери, для використання у хімічній галузі. Додатково при інтегруванні кавітаційної камери роторно-імпульсного теплогенератора в теплову систему змінилася конструкція теплообмінника «труба в трубі» на пластинчатий.

Розроблена автоматична система контролю та управління тепловою системою з використанням багатofункціонального віброчастотного вимірювального перетворювача для оцінки ефективності процесу кавітації шляхом визначення резонансної частоти коливання середовища. Значення витрати  $Q = 70\%$  відповідає максимальному ефекту інтенсифікації процесу кавітації. Виконані пуско-налагоджувальні роботи дозволили визначити можливість застосування розробленої автоматичної системи з відповідним програмним забезпеченням для контролю та управління роботою теплової системи.

Проведені стендові дослідження енергоефективності роботи теплової системи. Визначені показники енергоефективності системи з удосконаленою кавітаційною камерою теплогенератора. Виконаний аналіз шляхом порівняння з аналогом, описаним в літературі. Доказано, що вдосконалення теплової системи дозволило отримати вищі показники енергоефективності. Встановлено, що КПД з удосконаленою тепловою системою на базі в вдосконаленої кавітаційної камери на 7 % вище.

Отримані дані порівняльного аналізу дозволяють рекомендувати розроблений роторно-імпульсний теплогенератор як гідну альтернативу використовуваним теплоагрегатам у тепловій системі опалення промислових будівель та споруд, цехів підприємств, отримання горячої води для потреб хімічної галузі.

**Ключові слова:** кавітаційний теплогенератор, система контролю, роторно-імпульсний пристрій, багатofункціональний виброчастотний перетворювач.

**V. NIKOLSKY, O. OLIYNYK, A. LOBODENKO**  
**DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MONITORING THE OPERATION OF THERMAL SYSTEMS**  
**FOR DECENTRALIZED HEATING OF BUILDINGS**

An advanced industrial design of a rotary-pulse heat generator with a modified design of a cavitation chamber, integrated into the heating system of an industrial building was manufactured. Additionally, when integrating the cavitation chamber of the rotor-pulse heat generator into the thermal system, the design of the «pipe in pipe» heat exchanger was changed to a plate-type heat exchanger.

An automatic system for monitoring and controlling a thermal system has been developed using a multi-functional vibration-frequency measuring transducer to evaluate the effectiveness of the cavitation process by determining the resonant frequency of medium oscillations. The flow rate  $Q = 70\%$  corresponds to the maximum effect of the intensification of the process of cavitation. The commissioning works made it possible to determine the possibility of using the developed automatic system with appropriate software for monitoring and controlling the operation of the thermal system.

Conducted bench studies of energy efficiency of the thermal system. The indicators of energy efficiency of the system with an improved cavitation chamber of the heat generator are determined. Comparative analysis was performed by comparison with the analogue described in the literature. It is proved that the improvement of the thermal system allowed us to obtain improved energy efficiency indicators. It has been established that the efficiency of an improved thermal system based on an improved cavitation chamber is 7 % higher.

The obtained data of the comparative analysis allows recommending the developed rotary-pulse heat generator as a worthy alternative to the heat generating units used in thermal heating systems of industrial buildings and structures

**Keywords:** cavitation heat generator, control system, rotary-pulse device, multifunction vibration frequency converter.

**Введение.** Химическое производство принадлежит к числу наиболее энергоемких. Такая высокая энергоемкость со значительным потреблением энергии такими химическими производствами, как произ-

водство аммиака, фосфора, карбида кальция, химических волокон и пластмасс, которое составляет более 60 % электрической и 50 % тепловой энергии всей отрасли [1].

© В. Е. Никольский, О. Ю. Олейник, А. В. Лободенко, 2018

Поэтому одним из самых перспективных направлений в химической технологии является переход на энергосберегающие технологии и энергоэффективное оборудование. Кроме этого требования экологических стандартов вынуждают разработчиков придерживаться жесткой политики энергосбережения, которая основана на использовании энергосберегающих технологий, ядерной энергетики, альтернативных источников энергии, и прежде всего, возобновляемых. При этом главным фактором, обуславливающим необходимость энергосбережения, является истощаемость запасов органического топлива.

Важнейшей статьёй экономии в химической промышленности может стать использование унифицированных теплогенераторов нового поколения, которые высокими показателями энергоэффективности [1].

Теплогенераторы на основе кавитационного оборота – новое поколение тепловых машин на рынке отопительной техники. Нагрев теплоносителя осуществляется при преобразовании кинетической энергии жидкости в тепловую энергию за счет кавитационных вихревых эффектов [2]. Основное преимущество кавитационного теплогенератора перед тепловыми электронагревателями – отсутствие накипи и отложений на стенках аппарата и возможность работы на различных видах агрессивных и пожароопасных жидкостей.

В связи с тем, что существует много подходов к оценке эффективности тепловой работы РИА, актуальной задачей является контроль интенсивности процесса кавитации внутри аппарата.

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Теплогенераторы на основе кавитационных эффектов – новое поколение тепловых машин, преобразующих механическое и акустическое воздействие на жидкость в теплоту [3]. В работе [4] описан кавитационный теплогенератор, интегрированный в модель тепловой системы и метод оценки энергоэффективности работы оборудования, которая подтверждает конкурентоспособность этих аппаратов на рынке отопительного оборудования.

Однако основной трудностью, препятствующей массовому внедрению тепловых систем с кавитационными теплогенераторами для децентрализованного обогрева зданий является отсутствие в предлагаемом оборудовании интегрированных систем контроля работы кавитаторов.

При контроле процесса кавитации большинство известных методов сводится к контролю косвенных параметров процесса: давлению на входе и выходе кавитатора, скорости потоков жидкости и газа.

Главным недостатком описанных методов контроля процесса кавитации является то, что общепринятые измерения давления, скорости, уровня жидкости в кавитирующей камере проводить невозможно из-за эрозионного действия кавитации на измерительные преобразователи [5]. Кроме того, измеряемые величины не могут характеризовать кавитирующее поле, которое характеризует процесс кавитации.

Таким образом, работы, связанные с исследованиями и разработкой энергоэффективных теплогенераторов

на основе импульсной обработки теплоносителя с интегрированной системой контроля эффективности работы аппарата являются перспективным аспектом внедрения современных энергоэффективных технологий.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка и исследование высокоэффективных роторно-импульсных теплогенераторов с интегрированной системой контроля эффективности работы в системе децентрализованного обогрева сооружений промышленного назначения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработать опытно-промышленный образец роторно-импульсного теплогенератора с автоматической системой контроля эффективности работы аппарата;
- на основе измеренных параметров устойчивой работы теплогенератора оценить энергоэффективность системы путем сравнения с аналогами.

**Теплотехнические испытания теплогенератора и тепловой системы.** Система децентрализованного отопления представляет собой динамическую систему с большим числом возмущений. Поэтому эксплуатация тепловой системы без автоматическую систему контроля эффективности работы оборудования значительно усложняет наладку, управление теплоагрегатом.

Принципиальная схема кавитационной камеры разработанного теплогенератора приведена в работе описана в работе [4].

Разработанная тепловая система с кавитационным теплогенератором включает в себя два контура: первичный и вторичный (рис. 1). Подогрев воды происходит в первичном контуре. В состав первичного контура входит: РИТ, пластинчатый теплообменник, насос, бак накопитель. Подогретый в РИТ теплоноситель подается в пластинчатый теплообменник, где подогревает воду, поступающую на подогрев. Датчик температуры  $T_1$  фиксирует температуру теплоносителя, на выходе из кавитационного теплогенератора. Датчик температуры  $T_2$  контролирует температуру теплоносителя после пластинчатого теплообменника. Датчик температуры  $S_3$ , расположенный на входе воды вторичного контура, контролирует температуру теплоносителя подаваемого на подогрев в систему. При этом предусмотрено использование либо воды из городской водопроводной сети (ГВС) или же из контура циркуляции (ЦВС).

Значение измеряемой датчиком  $S_3$  температуры сравнивается с показаниями датчика  $S_1$ , установленного в верхней части бака-накопителя первичного контура. Если используется возобновляемая энергия, показания датчика  $S_1$  выше показаний датчика  $S_3$  и система работает в штатном режиме.

Значение измеряемой датчиком  $S_3$  температуры сравнивается с показаниями датчика  $S_1$ , установленного в верхней части бака-накопителя первичного контура. Если используется возобновляемая энергия, показания датчика  $S_1$  выше показаний датчика  $S_3$  и система работает в штатном режиме.

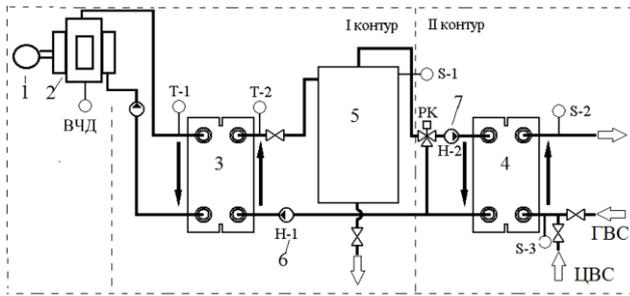


Рис. 1 – Принципиальная схема тепловой установки для теплоснабжения промышленного здания:

1 – электродвигатель АИР-160S2,  $N=15$  кВт,  $n = 2930$  об/мин; 2 – двухступенчатый кавитационный теплогенератор; 3, 4 – пластинчатый теплообменник Альфа Лаваль AlfaQ™; 5 – бак накопитель первичного контура; 6, 7 – питательный насос СРЗ 25-6

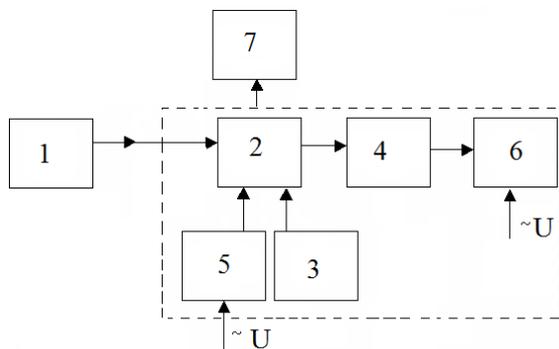


Рис. 2 – Функциональная схема автоматической системы контроля кавитационного теплогенератора:

1 – виброчастотный датчик давления с цилиндрическим резонатором; 2 – микроконтроллер; 3 – специализированное программное обеспечение; 4 – память; 5 – блок питания микроконтроллера; 6 – устройство отображения информации; 7 – регулирующий клапан

Датчик температуры  $S_2$  на выходе воды ГВС из вторичного контура измеряет значение температуры и регулирует положение регулирующего клапана РК таким образом, чтобы температура в системе ГВС постоянно поддерживалась и соответствовала заданному значению. Если выработанная энергия в баке-накопителе не может быть задействована в сеть (показания  $S_1$  меньше показаний  $S_3$ , клапан РК перекрыт, насос  $H_2$  отключен) в системе работает первичный контур (накапливается тепловая энергия) с теплогенератором. В этом случае подогрев воды ГВС осуществляется от резервного источника энергии (например, кавитационного вихревого аппарата).

Для оценки эффективности его работы кавитационного теплогенератора использовали резонансную частоту колебания возбужденной среды в качестве параметра контроля. Разработанная структурная схема (рис. 2) реализует предложенный метод контроля эффективности процесса кавитации путем измерения вибрации аппарата в сочетании с контролем основных параметров процесса. Для апробации разработанного метода контроля использовали виброчастотный мно-

гофункциональный преобразователь [5]. Измерялись вибрации при нескольких значениях температур.

Было проведено 7 опытных нагревов до фиксированных установившихся показателей (табл. 1). Температуру теплоносителя фиксировали при помощи датчиков температуры, схема размещения которых приведена на рис. 1.

Основная функция микроконтроллера – обеспечить возможность ряда пользовательских настроек, таких как контроль максимальной температуры в пластинчатом теплообменнике, определение резонансной частоты. Коррекция дополнительных погрешностей резонансных и температурных преобразователей осуществляется с использованием специализированного программного обеспечения. Программное обеспечение, представляет собой фильтр, выполненный в программной среде Python [6].

Эффективность работы тепловой системы оценивали по следующим показателям:

- температуре теплоносителя на входе в теплообменник  $t_1$ , °С;
- температуре теплоносителя на выходе из теплообменника  $t_2$ , °С;
- температуре воды на выходе из кавитатора  $t_3$ , °С;
- массе нагреваемого теплоносителя,  $m$ , кг;
- затраченной на нагрев электрической мощности,  $N_{затр}$ , кВт·ч;
- расходу нагреваемой среды,  $G$ , м<sup>3</sup>/час;
- резонансная частота колебаний, кГц;
- времени нагрева до заданной температуры,  $\tau$ , мин.

Таблица 1 – Экспериментальные данные энергоэффективности тепловой работы системы с интегрированным роторно-импульсным теплогенератором с многоступенчатой кавитационной камерой

$t_1$ , °С	$t_2$ , °С	$t_3$ , °С	$m$ , кг	$N_{затр}$ , кВт·ч	$G$ , м <sup>3</sup> /час	$\tau$ , мин
17,2	60	61	400	24	1,2	75

Положение регулирующего клапана изменяют от 0 до 100 % с шагом 10 %.

На рис. 3 приведены результаты определения частоты вынужденных колебаний амплитуды давления газожидкостной системы внутри кавитатора при трех положениях клапана в соответствии с приведенной функциональной схемой (рис. 2). Программное обеспечение по вычисленной зависимости  $f(\Delta P)$  определяет резонансную частоту  $f_p$  которой соответствует максимальная амплитуда  $\Delta P$  и значения положения регулирующего клапана, которое обеспечивает интенсифицирующее воздействие расход воды (рис. 2). Значения расхода  $Q = \%$  соответствует максимальному эффекту интенсификации процесса кавитации.

Коэффициент полезного действия КПД, определенный по показателям (табл. 1) в соответствии с методикой [4], составил  $\eta = 0,84$ .

Анализ показателей энергоэффективности позволяет утверждать, что тепловая система с интегрированным роторно-импульсным теплогенератором с многоступенчатой кавитационной камерой по энерго-

ефективності перевищує відповідні їй аналоги. Підвищення КПД роботи теплової системи до  $\eta = 0,84$  проти  $\eta = 0,77$ , зафіксованого при роботі теплогенератора з 400-літровою ємкістю, котра моделювала теплову систему [7], пов'язано з роботою в оптимальному режимі роботи кавітаційного теплогенератора за рахунок використання інтегрованої системи контролю.

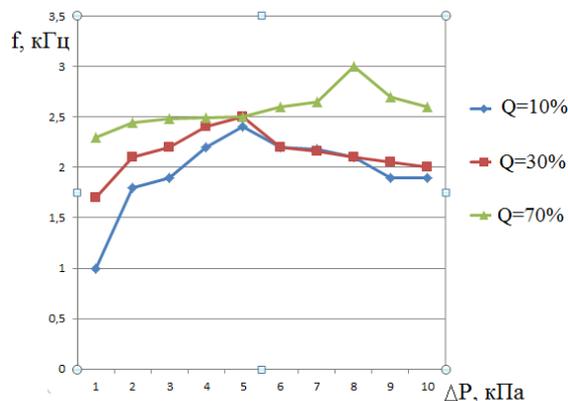


Рис. 3 – Визначення резонансної частоти змусованих коливань всередині кавітатора

Перспектива подальших досліджень пов'язана з пошуком можливостей підвищення КПД теплової системи з роторно-імпульсним теплогенератором за рахунок зміни конструктивних характеристик елементів кавітаційного теплогенератора.

#### Висновки

1. Проведені стендові промислові випробування розробленого та інтегрованого в теплову систему обігріву промислового будівництва РИТ з двохступенчастою системою кавітації. Встановлено, що

КПД удосконаленої теплової системи на основі РИТ на 7% вище.

2. Розроблена автоматична система контролю та управління тепловою системою з використанням віброчастотних датчиків для оцінки ефективності процесу кавітації. Проведені пуско-налагодочні роботи дозволили визначити можливість застосування розробленої автоматичної системи з відповідним програмним забезпеченням для контролю та управління роботою теплової системи.

#### Список літератури

1. Design and implementation of an intelligent energy saving system based on standby power reduction for a future zero-energy home environment / Byun J., Park S., Kang B., Hong I., Park S. // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2013. Vol. 59, Issue 3. P. 507–514. doi: 10.1109/tce.2013.6626231.
2. Heating and Cooling of Buildings: Principles and Practice of Energy Efficient Design / Reddy A., Kreider J. F., Curtiss P. S., Rabl A. CRC Press, 2016. 900 p. doi: 10.1201/9781315374567.
3. Connolly D., Lund H., Mathiesen B. V. Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 60. P. 1634–1653. doi: 10.1016/j.rser.2016.02.025.
4. V. Nikolsky Development and investigation of energy efficient unified equipment for energy technological manufactures [Text] / V. Nikolsky, O. Oliynyk, V. Ved O. Svetkina, A. Pugach, A. Shvachka // Eastern-European journal of enterprise technologies. 2018. Vol. 3/8. N. 93. P.59–65.
5. Taranenko Y. K. Multifunctional vibration frequency transducer with cylindrical resonator [Text] / Y. K. Taranenko, O. Y. Oliynyk // Measurement Techniques. 2018. Vol. 61, No. 7. C. 41–46.
6. Oliynyk, O. Investigation of the Kalman filter in the noise field with an excellent Gaussian distribution [Text] / O. Oliynyk, Y. Taranenko, D. Losikhin, A. Shvachka // Eastern-European journal of enterprise technologies. 2018. Vol. 4/4. N. 94. P. 36–42
7. A new type of district heating system based on distributed absorption heat pumps / Li Y., Fu L., Zhang S., Zhao X. // Energy. 2011. Vol. 36, Issue 7. P. 4570–4576. doi: 10.1016/j.energy.2011.03.019.

Надійшла (received) 16.11.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Нікольський Валерій Євгенович (Нікольский Валерий Евгеньевич, Nikolsky V.)** – доктор технічних наук, професор кафедри енергетики Українського державного хіміко-технологічного університету, м. Дніпро, Україна, 49005, e-mail: vnikols1@mail.ru. Тел.: (096) 740-36-41, ORCID: orcid.org/0000-0001-6069-169X, Scopus Author ID: 57190444395.

**Олійник Ольга Юрївна (Олейник Ольга Юрьевна, Oliynyk O.)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій і метрології Українського державного хіміко-технологічного університету, м. Дніпро, Україна, 49005. E-mail: oleinik\_o@ukr.net. Тел.: 0684072464, ORCID: orcid.org/0000-0003-2666-3825 Scopus Author ID: 57193440360.

**Лободенко Антоніна Вікторівна (Лободенко Антонина Викторовна, Lobodenko A.)** – кандидат технічних наук, асистент кафедри машинобудування та інженерної механіки Українського державного хіміко-технологічного університету, м. Дніпро, Україна, 49005 E-mail: lav190188@gmail.com. Тел.: 0969875775.