

METHODS, USED TO EVALUATE THE ENERGY EFFICIENCY OF SYSTEMS FOR TRANSPORTING FLUIDS³

Eng. Reneta Dimitrova, PhD student

Department of Thermodynamics, Hydraulics and Environmental Engineering

University of Ruse

Tel.: +359 888 236

E-mail: rddimitrova@uni-ruse.bg

Abstract: This work represents an analysis of some approaches and methods for evaluating the energy consumption used for the transportation of fluids in pump and fan systems. As a criteria of effectiveness of the investigated systems the specific energy consumption, representing the consumed energy for the transportation of a unit fluid, has been selected. Exclusive attention is paid to the clarifying of the impact of this criteria on different factors, such as: the used method of flow rate regulation and change of the system's static head; the technical state of the pump aggregate, the features of the transported fluids; the electrical drive's work regime changing, etc. Different methods for quantitative evaluation required for accomplishing a comparative analysis of the impact of the investigated factors on the energy efficiency of systems used to transport fluids, has also been presented.

Keywords: Energy efficiency, Pumps, Fans, Flow rate regulation

ВЪВЕДЕНИЕ

Турбопомпените и вентилаторните системи са едни от най-разпространените системи в промишлеността, енергетиката, селското стопанство и бита. Те са съставна част от множество технологични процеси, свързани с транспорт на флуиди. Вентилаторите са основна част от системите за осигуряване на необходимия микроклимат във всякакъв вид сгради – жилищни, промишлени, селскостопански и др.

Според (Gulich, 2010) праодажбите на турбопомпи в световен мащаб са на стойност от близо 20 милиарда USD годишно. Широкото разпространение на този вид машини в съвременния живот ги превръща в значителен консуматор на енергия, основно електрическа. Според изследвания на United States Department of Energy/Lawrence Berkeley National Laboratory и на Европейската комисия, енергията на 22% от инсталираните в световен мащаб електродвигатели, се изразходва за задвижване на турбопомпи, а 16% - за задвижване на вентилатори (Augustyn, 2012). Изследване на Dena (Deutsche Energie-Agentur GmbH) показва, че за 2000 година в Европейския съюз са консумирани 951 TWh електроенергия. Около 46 TWh от тях са изразходени за задвижване на турбопомпи (Vogelshang, 2008). Представената информация доказва необходимостта от задълбочено изследване работата на системите за транспорт на флуиди, с цел определяне на енергоефективните режими, както и на най-ефективните начини за тяхното постигане. По тези причини все повече съвременни изследователи концентрират усилията си в търсене на нови подходи и методи за оценяване разхода на енергия за транспортиране на флуиди в помпени и вентилаторни системи. В настоящата работа са анализирани такива подходи и методики, като е обърнато внимание на влиянието на различни фактори върху ефективното оплотворяване на енергията в помпените и вентилаторните системи за транспорт на флуиди, а именно: използвания метод за регулиране на дебита и изменението на статичния напор на системата, техническото състояние на помпения агрегат, брой съвместно работещи помпени агрегати, свойствата на транспортираните флуиди, промяната на работните режими на електродвиждането и др. Показани са методи за количествена оценка на изследваните фактори при извършване на

³ Докладът е представен на сесията на секция Топлотехника и хидравлика на 25 октомври 2019 г. с оригинално заглавие на български език: МЕТОДИ, ИЗПОЛЗВАНИ ЗА ОЦЕНКА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА СИСТЕМИ ЗА ТРАНСПОРТ НА ФЛУИДИ

сравнителни анализи на системи за транспорт на течности и газове относно тяхната енергийно ефективна работа.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Критерий за оценка енергината ефективност на сиситеми за транспорт на флуиди

Съгласно стандарта EN 13779:2006 (E) „Ventilation for non-residential buildings — Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems“, енергийната ефективност на вентилаторни уредби се оценява с величината specific fan power, която се определя по зависимостта:

$$P_{SFP} = \frac{p}{\eta_{tot}}, [kWh/m^3], \quad (1)$$

където p е пълното налягане на вентилатора; η_{tot} – пълнен коефициент на полезно действие на вентилаторната уредба, включващ КПД на вентилатора и КПД на задвижването (механична предавка, електродвигател, честотен инвертор).

В стандарта EN ISO 14414:2015 „Pump system energy assessment“ е дефинирана величината специфичен разход на енергия e_V , използвана в (Popov, Klimentov & Kostov, 2011) за оценка енергийната ефективност на помпени системи. Тя се определя по формулата:

$$e_V = \frac{g}{3600} \frac{H}{\eta} \cdot [kWh/m^3], \quad (2)$$

където $g, [m/s^2]$ е земното ускорение; $H, [m]$ – напорът на помпата; η – коефициент на полезно действие (КПД) на електропомпния агрегат.

Величините e_V и P_{SFP} имат смисъл на електроенергия, изразходвана за транспортиране на един кубичен метър флуид в съответната помпена или вентилаторна сиситема, а връзката между тях е:

$$e_V = 3,6 P_{SFP} = 3,6 \frac{p}{\eta}, [kWh/m^3]. \quad (3)$$

Аналитично представяне характеристиките на турбопомпи и вентилатори

Аналитичното изследване работата на турбопомпи и вентилаторни системи изисква познаването на работните характеристики на машините $H = f(Q)$, $p = f(Q)$ и $\eta = f(Q)$. Най-удобно е тези зависимости да бъдат представени в аналитичен вид. Известно е, че в работната област на машината гарфичните зависимости $H = f(Q)$ и $\eta = f(Q)$ (η – КПД на помата) добре се апроксимират с полиноми от втора степен, които имат вида:

$$H = a + bQ + cQ^2 \quad (4)$$

и

$$\eta = d + eQ + fQ^2. \quad (5)$$

В (Klimentov, Popov&TuJarov, 2008) авторите предлагат стойности на коефициентите a, b, c, d, e и f от уравнения (4) и (5), определени за 55 центробежни помпи с общо предназначение, произведени във Випом АД, гр. Видин. Наличието на тази база от данни улеснява значително провеждането на аналитични изследвания работата на турбопомпени системи.

Един от широко използваните методи за проектиране на центробежни вентилатори е с помощта на методите на подобие. За целта са необходими аеродинамична схема на вентилатора с всички необходими размери, както и т. нар. коефициентни характеристики на моделния вентилатор. Тези характеристики представляват графични зависимости от вида: $n_q = f(\varphi)$, $\psi = f(\varphi)$, $\eta = f(\varphi)$ (η – КПД на вентилатора), където: $n_q = \frac{nQ^{0,5}}{p^{0,75}}$ е специфичната честота на въртене на вентилатора; $\varphi = \frac{4Q}{\pi D_2^2 u_2}$ – коефициент на дебит; $\psi = \frac{2p}{\rho u_2^2}$ – коефициент на налягане. Характеристиките $\psi = f(\varphi)$ и $\eta = f(\varphi)$ имат един и същи вид за серия подобни машини. Те също могат да бъдат представени, в работната си област, с уравнения от вида:

$$\psi = \bar{a} + \bar{b}\varphi + \bar{c}\varphi^2 \quad (6)$$

и

$$\eta = \bar{d} + \bar{e}\varphi + \bar{f}\varphi^2, \quad (7)$$

където коефициентите $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}, \bar{e}$ и $\bar{f}$ са безразмерни. В (Popov, G., K. Klimentov, B. Kostov, Al. Vozhinov, 2018) са определени и представени коефициентите от уравнения (6) и (7) на 52 едностъпални центробежни вентилатора, нормално изпълнение, разработени в Централния аерохидродинамичен институт „Жуковски“ (ЦАГИ) в Москва. Този вид характеристики, представени аналитично, също са много удобни за изследване работата на вентилаторни системи.

Методи за оценка разхода на енергия при регулиране дебита на системи за транспорт на флуиди

Представянето на работните характеристики на турбопомпите и вентилаторите с полиноми от вида (4), (5), (6) и (7) дава възможност за разработване на методи за аналитично определяне режимите на работа в системите за транспорт на флуиди, както и за оценка енергийната ефективност на методите за регулиране дебита в тези системи. Такъв метод е представен в (Popov, G., K. Klimentov, B. Kostov, 2011). В работата са изведени уравнения за определяне специфичния разход на енергия e_V , при три метода за регулиране дебита на турбопомпени системи – чрез дроселиране, чрез промяна честотата на въртене на помпата и чрез отвеждане на част от дебита. При дроселно регулиране изразът за определяне на специфичния разход на енергия $e_{V,1}$ при даден дебит Q_1 , получен в следствие на дроселирането, се определя по израз:

$$e_{V1,dr} = \frac{g}{3600} \frac{H_1}{\eta_1} = \frac{g}{3600} \frac{(a+bQ_1+cQ_1^2)}{(d+eQ_1+fQ_1^2)}, \quad (8)$$

където H_1 и η_1 са съответно напорът и коефициентът на полезно действие на помпата при новия режим (при дебит Q_1). Величината η_1 в уравнение (8) може да има смисъл на коефициент на полезно действие на електропомпния агрегат, отчитащ КПД на електрозадвижването и на механичните предавки, ако е известно как те се изменят в процеса на регулиране.

При регулиране чрез промяна честотата на въртене на помпата, $e_{V1,n}$ при новия режим се определя по уравнението (Popov, G., K. Klimentov, B. Kostov, 2011):

$$e_{V1,n} = \frac{g}{3600} \frac{H}{(d+eQ_N+fQ_N^2)} \left[\frac{H_{st}}{H} + \left(1 - \frac{H_{st}}{H} \right) \left(\frac{Q_1}{Q} \right)^2 \right], \quad (9)$$

където: H_{st} е статичният напор на тръбната система; H и Q – изходните стойности на напора и дебита в системата; Q_N – дебитът на помпата при номинална честота на въртене и режим, подобен на режима с дебит Q_1 . Стойността му се определя по зависимостта:

$$Q_N = \frac{1}{2(m_1-c)} \left(\sqrt{b^2 + 4a(m_1-c)} + b \right), \quad (10)$$

където m_1 е коефициентът на параболата на подобните режими, определен по формулата:

$$m_1 = \frac{H_1}{Q_1^2}. \quad (11)$$

При регулиране чрез отвеждане на част от дебита (чрез „bypass“), специфичният разход на енергия се определя по зависимостта (Popov, G., K. Klimentov, B. Kostov, 2011):

$$e_{V1,b} = \frac{g}{3600} \frac{H}{(d+eQ_p+fQ_p^2)} \left[\frac{H_{st}}{H} + \left(1 - \frac{H_{st}}{H} \right) \left(\frac{Q_1}{Q} \right)^2 \right] \frac{Q_p}{Q_1}. \quad (12)$$

Величините H и Q в уравнение (12) представляват показателите на помпата при напълно затворен регулиращ орган в отвеждащата тръба. Дебитът на помпата Q_p при този метод на регулиране се определя с израз:

$$Q_p = \frac{1}{2c} \left(\sqrt{b^2 + 4c(a-H_1)} - b \right). \quad (10)$$

Представената методика дава възможност за сравнително лесно и бързо определяне на специфичния разход на енергия за помпени системи с турбопомпи, като е приложима и за вентилаторни системи. На базата на тази методика, в (Popov, Klimentov&Kostov, 2019) е разработена методика за изследване влиянието на метода за регулиране на вентилаторни системи върху специфичния разход на енергия, чрез използване на коефициентните характеристики $\psi = f(\varphi)$ и $\eta = f(\varphi)$. За оценка енергийната ефективност на изследвания метод за регулиране, тук е използвана зависимост от вида $\frac{P_{SFP,i}}{P_{SFP,0}} = f\left(\frac{Q_i}{Q_0}\right)$, където $P_{SFP,i}$ е текущата стойност на SFP при дебит Q_i , а $P_{SFP,0}$ е стойността на SFP при първоначалният режим за съответния метод на регулиране, на който съответства дебит Q_0 .

Изследване разхода на енергия при регулиране дебита на помпени и вентилаторни системи

В (Popov, G., K. Klimentov, B. Kostov, 2011) е проведено сравнително аналитично изследване разхода на енергия при три метода за регулиране дебита на турбопомпени системи – чрез дроселиране, чрез промяна честотата на въртене на помпата и чрез отвеждане на част от дебита. Изчисленията са проведени с помощта на цитираната в предходната точка методика. От получените резултати става ясно, че при всички случаи честотното регулиране е най-ефективно, като специфичният разход на енергия намалява с намаляване на дебита в системата. Установено е и до каква степен този метод на регулиране е по-ефективен от останалите два, а така също и влиянието на статичния напор на помпената система и първоначалния режим върху специфичния разход на енергия при трите метода на регулиране. Подобно изследване е проведено в работата (Popov, Klimentov&Kostov, 2019). Тук авторите сравняват три метода за регулиране дебита във вентилаторни системи: чрез дроселиране, чрез промяна честотата на въртене на вентилатора и чрез входящ направляващ апарат. Обект на изследванията са три центробежни вентилатора с различна специфична честота на въртене. При провеждане на изчисленията са отчетени промените в КПД на вентилаторите, на задвижващите електродвигатели, както и на честотните инвертори при честотното регулиране. Относно влиянието КПД на електрозадвижването, авторите са използвали резултати от работата на Novakov&Popov (2018). От получените резултати се вижда, че честотното регулиране е най-ефективно при трите изследвани вентилатора, регулирането с входящ направляващ апарат превъзхожда дроселното регулиране от енергоефективна гледна точка. Установено е, че при малки дълбочини на регулирането $\left(\frac{Q_0-Q}{Q_0} \leq 0,1\right)$ на вентилаторни системи, енергийната ефективност при използване на входящ направляващ апарат е близка до тази на регулирането с инверторно задвижване на вентилаторите. Относно влиянието вида на вентилатора, авторите стигат до изводите, че при регулиране на вентилаторни системи с използване на честотни инвертори, специфичната честота на въртене не оказва влияние върху ефективността на регулирането. Дроселно регулиране на вентилаторни системи е по-енергийно ефективно при вентилатори с по-ниска специфичната честота на въртене, а използването на входящ направляващ апарат е по-изгодно при вентилатори с по-висока специфичната честота на въртене.

В (Klimentov, Popov&Kostov, 2013) е изследван разхода на енергия в турбопомпени системи при работа на центробежни помпи с двуфазна смес от течност и неразтворен въздух. Анализирана е възможността подаването на въздух пред входа на помпата да се използва като метод за регулиране на дебита в системата. Доказано е, че регулирането чрез подаване на въздух пред входа на помпата е икономически по-изгодно от дроселното регулиране при системи със статичен напор, особено в случаите, когато $\frac{H_{st}}{H_0} \leq 0,4$.

Изследване разхода на енергия при съвместна работа на центробежни помпи

Много често в системите за транспорт на течности се използва съвместна работа на две или повече помпи, работещи в паралел. В някои случаи се налага промяна на броя на работещите съвместно помпени агрегати, с цел промяна на дебита в системата. Определянето на енергоефективните режими на работа в тези случаи е изключително важно, тъй като

консумацията на електроенергия в такъв тип системи е значителна. В работата си (Поров, G., K. Klimentov, K. Tujarov, M. Mihaylov, 2009) авторите предлагат зависимости за аналитично определяне на режимните параметри при паралелна работа на две и повече еднакви центробежни помпи, както и при паралелна работа на две еднакви центробежни помпи, едната от които се регулира честотно.

В (Kostov, Popov&Klimentov, 2013) е проведено изследване енергийната ефективност на системи за транспорт на течности с три паралелно работещи помпени агрегата, при използване на стъпално регулиране на дебита. В резултат е установено влиянието на последователността на включване (изключване) на паралелно работещите помпени агрегати върху специфичния разход на енергия в системата. Подобно изследване е публикувано в (Поров, Kostov&Klimentov, 2012), където са установени редица важни изводи относно влиянието на вида и формата на напорните характеристики на помпите върху енергоефективната им работа в паралел.

Осигуряването на енергоефективна работа на системи със съвместно работещи помпени агрегати изисква предварително познаване на ефективното работно поле на всяка една от помпите. В (Поров, Kostov&Klimentov, 2013) е предложена методика за аналитично определяне на ефективното поле на дадена помпа и е изследвано изменението на това поле при съвместна работа на няколко помпени агрегата. Дефинирани са някои особености, които оказват влияние върху енергийната ефективност на помпените системи с паралелно работещи помпи.

Влияние на температурата върху енергийната ефективност на помпените системи

Постигането на оптимални работни режими в помпени системи за битово водоснабдяване е сложна и не винаги достижима цел. Върху работата на такъв тип системи оказват влияние различни фактори. Влиянието на някои от тези фактори не винаги се отчита. Пример за такъв фактор е променливата температура на водата. В (Kostov, 2018) авторът е провел моделно изследване относно влиянието на този фактор върху разхода на енергия в действаща помпена система за битово водоснабдяване, като е предложена методика за качествено и количествено оценяване на ефекта. От резултатите става ясно, че negliжирането на ефекта от температур-ната промяна при транспортиране на студена вода (за битови нужди) в някои случаи, и при определени усло-вия, може да доведе до груби грешки в изготвянето на енергийния баланс на дадена помпена система. Предложената от автора методика е препоръчително да се прилага в случай, че тръбната система е изградена от полиетиленови, а не от стоманени тръби, каквито са и съвременните тенденции, заложили още при проектирането на този тип системи. Освен това тя би могла успешно да се приложи и за вентилационни системи, където транспортираният флуид е въздух или друг газ, при което температурната разлика варира в по-голям интервал, а влиянето ѝ върху плътността (вискозитета) е значително.

Влияние на атмосферните условия върху разхода на енергия на вентилаторните системи

Вентилаторните системи за транспорт на въздух работят обикновено при променливи атмосферни условия, което обуславя динамично изменение на параметрите на въздуха. Това води до отклонение от предвидените режими на работа на системата, което би могло да доведе до влошаване на нейната енергийна ефективност. В (Поров, Taneyv&Jheleva, 2013) е предложена методика за определяне изменението на разхода на енергия на вентилаторните системи при промяна на атмосферните условия, с цел оценка на тяхната енергоефективност. Проведеното изследване показва, че изменението на параметрите на атмосферния въздух оказва влияние върху разхода на енергия на вентилаторните системи. Това се дължи основно на промяната на плътността на въздуха. Изменението на специфичния разход на енергия варира в границите от 10 до 14% за изследваната система и трябва да се има предвид при анализа на енергийната ефективност на вентилаторни системи.

Влиянието на променливата плътност на въздуха е изследвано и в (Роров, 2014). В работата е предложен метод за отчитане на това влияние върху специфичния разход на енергия. Зависимостите са получени с помощта на уравненията на характеристиките на вентилаторите и на тръбната система. Представеният метод дава възможност за провеждането на сравнително лесни и бързи изследвания и анализи на енергийната ефективност на вентилаторни системи. В резултат на проведеното числено изследване в работата, авторът е достигнал до извода, че промяната на плътността на въздуха от $1,15 \text{ kg/m}^3$ до $1,3 \text{ kg/m}^3$ води до нарастване на специфичния разход на енергия с над 10% при първоначален режим, отговарящ на номиналния дебит.

Влияние на техническото състояние на помпените агрегати върху разхода на енергия в помпените системи

Техническото състояние на помпените агрегати е важен фактор за енергоефективната работа на системите за транспорт на течности. Както е известно, в процеса на експлоатация на центробежните помпи, най-интензивно се износват детайлите в областта на предното (и задното, ако има такова) уплътнение на работното колело. Това довежда до увеличаване на обемните загуби в помпата, намаляване на обемния и съответно на пълния КПД на помпата, което води до промяна в специфичния разход на енергия на системата. В (Роров, Klimnetov&Kostov, 2012) е изследвано влиянието на увеличените уплътнителни хлабини в центробежна помпа върху разхода на енергия при транспорт на течности. Резултатите от изследването са получени на базата на опитни данни и дават основание на авторите да направят няколко важни извода относно влиянието на първоначалния дебит, статичния напор на системата и увеличените хлабини върху специфичния разход на енергия, а именно (Роров, Klimnetov&Kostov, 2012):

- изходния работен режим оказва влияние върху нарастването на разхода на енергия при увеличени хлабини в помпата;
- при системи с по-голям относителен статичен напор нарастването на специфичния разход на енергия е в по-голяма степен спрямо такива с по-малки статични напори;
- съчетанието между понижен спрямо номиналния режим дебит, голям статичен напор и голяма хлабина в предното уплътнение определя значително нарастване на разхода на енергия спрямо изходния (с около 20% в цитираното изследване).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работата е направен обзор на методите за изследване енергийната ефективност на системи за транспорт на флуиди – турбопомпени и вентилаторни. Разгледано е влиянието на различни фактори върху специфичния разход на енергия в тези системи: методът на регулиране на дебита, съвместната работа (в паралел) на помпените агрегати, температурата на транспортирания флуид, атмосферните условия и плътността, при транспорт на въздух, техническото състояние на машините. От направения обзор става ясно, че разгледаните методи за оценка разхода на енергия с, отчитане на различните фактори, които оказват влияние върху него, гарантират надеждни резултати и дават възможност за сравнително бързи и лесни анализи на работата на системите за транспорт на течности и газове, независимо дали в системата работят един или няколко електропомпени агрегати.

REFERENCES

- Augustin, T. Energy efficiency and savings in pumping systems– the holistic approach (2012). Southern African Energy Efficiency Convention (2012SAEEEC).
- EN 13779:2006 (E) „Ventilation for non-residential buildings — Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems“ (2006).
- EN ISO 14414:2015 „Pump system energy assessment“ (2015).
- Gulich J. F., Centrifugal pumps. Second edition. (2010) Springer.

Klimentov, K., G. Popov, B. Kostov. Energy efficiency of centrifugal pumps working with water-air two-phase mixtures (2013). Proceedings of the XVIII National Scientific Conference with International Participation fреpm 2013. Vol. II. Fluid mechanics, fluid machines, hydraulics and pneumatics clothing and textiles: design and technologies. pp 93-100. **(Оригинално заглавие:** *Климентов, К., Г. Попов, Б. Костов Изследване енергийната ефективност на центробежни помпи при работа с двуфазни водо-въздушни смеси. Сборник доклади XVIII научна конференция с международно участие - Том II, Созопол, 2013., стр. 93-100).*

Klimentov, K., G. Popov, K. Tujarov. Equations of centrifugal pumps' characteristics (2008). Energetica, value 6-7, Sofia, pp 60-63. **(Оригинално заглавие:** *Климентов, Кл., Г. Попов, Кр. Тужаров (2008). Уравнения на характеристиките на центробежни помпи // Сп. Енергетика бр. 6-7, София, 2008, стр. 60-63).*

Kostov, B. Impact of cold water temperature variation on the energy efficiency of a water supply pump system with variable demand (2018).// International Review of Mechanical Engineering (IREME), 2018, No т.12 бр.7, pp. 604-612, ISSN 2532-5655. (SJР rank: 0.25 /2017, SCIMAGO INSTITUTIONS RANKINGS).

Kostov, B., G. Popov, K. Klimentov. Effective regulation of the flow rate of parallel working pumps (2013)// International virtual journal for science, technics and innovations for the industry, 2013, No 6, pp. 57-59, ISSN 1313-0226.

Kostov, B., G. Popov, Kl. Klimentov. Energy Efficiency Of Pump Systems (2014). Agricultural machinery, Year LX, Vol.1 Sofia, 2014, ISSN 0861-9638.

Novakov, N., G. Popov. Some aspects of using variable frequency drive in pump systems (2018). Toplotechnica 13, , book 10, Varna, ISSN 1314-2550. **(Оригинално заглавие:** *Новаков, Н., Г. Попов. Определяне коефициента на полезно действие на регулируеми електрозадвигвания на помпени агрегати. Сп. Топлотехника 13, 2018, брой 10, ISSN 1314-2550).*

Popov, G., Influence of air's density on the energy consumption of fan systems (2014). Toplotechnica 6, Year 5, book 1, Varna, ISSN 1314-2550, pp 72-75. **(Оригинално заглавие:** *Попов, Г. Влияние на плътността на атмосферния въздух върху разхода на енергия на вентилаторните системи // Топлотехника 6, год. 5, книга 1, Варна, 2014, ISSN 1314-2550, стр. 72-75).*

Popov, G., B. Kostov, K. Klimentov. Energy Investigation of a pump system's performance when a different number of same type pumps work in parallel (2012). Scientific conference of Angel Kanchev University of Ruse and Union of Scientists – Ruse. Vol. 51, book 1.2. ISSN 1311-3321. pp 180-185. **(Оригинално заглавие:** *Попов, Г., Костов Б., Кл. Климентов. Изследване на разхода на енергия при паралелна работа на центробежни помпи (2012)// Научни трудове на РУ, т. 51, сер. 1.2, Русе 2012, стр. 180-185).*

Popov, G., B. Kostov, K. Klimentov. Effective work regimes of centrifugal pumps working in parallel (2013). Toplotechnica, Varna, value 4, ISSN 1314-2550, pp 36-39. **(Оригинално заглавие:** *Попов, Г., Б. Костов, К. Климентов. Ефективни работни режими при паралелна работа на центробежни помпи (2013)// Топлотехника, Варна, 2013, брой 4, ISSN 1314-2550, стр 36-39).*

Popov, G., B. Kostov, K. Klimentov. Investigation of the effective work zones of the pump (2013). Toplotechnica, Varna, value 4, ISSN 1314-2550, pp 40-43. **(Оригинално заглавие:** *Попов, Г., Б. Костов, К. Климентов. Изследване на енергийно-ефективните работни полета на помпени агрегати // Топлотехника, Варна 2013, брой 4, ISSN 1314-2550, стр 40-43).*

Popov, G., I. Jeleva, R. Tanev. Economic evaluation of the effectiveness of flow rate's regulation when a frequency method is used (2012). Scientific conference of Angel Kanchev University of Ruse and Union of Scientists – Ruse. Vol. 51, book 1.2. ISSN 1311-3321. pp 175-179. **(Оригинално заглавие:** *Попов, Г., Ив. Желева, Р. Танев. Икономическа оценка ефективността от използване на честотно регулиране дебита на помпени системи (2012) // Научни трудове на РУ, т. 51, сер. 1.2, Русе 2012, стр. 175-179.).*

Popov, G., B. Kostov, M. Hristova, D.Ivanova, A. Krusteva (2014). Optimizing the energy consumption of an industrial watersupply pump system by ensuring an optimal flow rate.// HIDRAULICA, 2014, No 4, pp. 42-50, ISSN 1453 – 7303. (Global Impact factor: 1.345 /2014, <http://hidraulica.fluidas.ro/>)

Popov, G., K. Klimentov, B. Kostov. Investigating the influence of the technical state of the pump aggregates on the energy consumption of pump sysytem (2012). Toplotechnica 3, 3,Varna, ISSN 1314-2550, pp 64-67. (**Оригинално заглавие:** Попов Г., Кл. Климентов, Б. Костов. Изследване влиянието на техническото състояние на помпените агрегати върху разхода на енергия в помпените системи.// Топлотехника, 2012, брой 3, 64-67).

Popov, G., K. Klimentov, B. Kostov (2019). Investigation of the energy consumption in regulating the flow rate of fan systems. 2019 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 595 (2019) 012012.

Popov, G., K. Klimentov, B. Kostov. Investigation of the energy consumption in regulating the flow rate of pump systems (2011). DEMI'2011, Banja Luka (Bosnia), 2011, pp. 481-487

Popov, G., K. Klimentov, B. Kostov. Methods to estimate the energy consumption in regulating the flow rate of pump systems (2011). DEMI'2011, Banja Luka (Bosnia),

Popov, G., K. Klimentov, B. Kostov, Al. Bozhinov. Analytical presentation of the Dimensionless Characteristics of centrifugal fans (2018). 57th Science Conference of Ruse University, Bulgaria, 2018. (**Оригинално заглавие:** Попов Г., Кл. Климентов, Б. Костов, Ал. Божинов. Аналитично представяне на безразмерните характеристики на центробежни вентилатори (2018). 57 Научна конференция на Русенски университет. 2018).

Popov, G., K. Klimentov, K. Tujarov, M. Mihaylov. Determination of energy effective regimes of centrifugal pums working in parallel (2009). Energetica, value 6-7, Sofia, pp 44-48. (**Оригинално заглавие:** Попов, Г., Кл. Климентов, Кр. Тужаров, М. Михайлов. Определяне на енерго-ефективните режими при паралелна работа на центробежни помпи (2009) // Сп. Енергетика 6-7, София, 2009, стр. 44-48.).

Popov, G., R. Tanev, I. Jeleva. Investigation of the impact of the atmosphere conditions on the energy consumption in fan systems (2013). Scientific conference of Angel Kanchev University of Ruse and Union of Scientists – Ruse. Vol. 52, book 1.2. ISSN 1311-3321. pp 113-117. (**Оригинално заглавие:** Попов, Г., Р. Танев, Ив. Желева. Влияние на атмосферните условия върху разхода на енергия на вентилаторните системи (2013) // Научни трудове на РУ, т. 52, сер. 1.2, Русе 2013, стр. 113-117.).

Vogelesang, H. An introduction to energy consumption in pumps (2008). WORLD PUMPS January 2008, pp 28-31.