



Получена: 20.12.2019 г.

Приета: 22.01.2020 г.

ОБЕКТИВЕН ИЗБОР НА МАШИНИ ЗА ОБЕЗВОДНЯВАНЕ НА УТАЙКИ

Р. Арсов¹

Ключови думи: утайки, ПСОВ, обезводняване

РЕЗЮМЕ

В санитарната техника за обезводняване на утайки от пречиствателни станции за отпадъчни води (ПСОВ) традиционно се използват два основни вида машини, чието действие се различава принципно: машини за разделяне на суспензии чрез филтруване през полупропускливи мембрани – вакуумфилтри и филтърпреси; машини за разделяне на суспензии в потенциално (центробежно) поле – утаителни центрофуги.

Обикновено изборът на една или друга машина за обезводняване на утайки се извършва чрез неясно обосновани предпочитания към техния вид и производител. Основна причина за това е обстоятелството, че общоприетите критерии в това отношение не отчитат в достатъчна степен качествените характеристики на конкретните утайки, както и редица важни технико-икономически параметри на машините за обезводняване.

В настоящата статия са разгледани подходящи технологични критерии за оценка на машините за обезводняване чрез филтруване с образуване на филтърен кек, оценени количествено чрез две важни характеристики на утайките – „специфично съпротивление r' “ и „коэффициент на свиваемост σ “. Разгледани са и технологичните параметри на утаителните центрофуги с отчитане на утаителните характеристики на конкретните утайки. Предложени са технико-икономически критерии на машините за обезводняване с отчитане на приложените мощност и енергия и съответния коефициент на полезно действие при обезводняване на утайки с конкретни филтрационни и/или утаителни параметри. Практическото им приложение е илюстрирано с примерни решения.

Представените технологични и технико-икономически параметри, както и направените чрез тях анализи позволяват по-обоснован и мотивиран избор на машина за обезводняване на утайки от отпадъчни води с конкретни свойства.

¹ Румен Арсов, проф. дтн инж., кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на водите“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: rv_arsov@abv.bg

1. Въведение

Както е известно, утайките от пречиствателните станции за отпадъчни води (ПСОВ) са двуфазни дисперсни системи, състоящи се от твърда фаза с определена дисперсност, химичен състав и повърхностно-активни свойства и от течна фаза с определен химичен състав и вискозност. Поради високото съдържание на течната фаза (т.нар. „утайкова вода“) утайките, отделяни от пречиствателните съоръжения, имат течна консистенция.

Поради високото органично съдържание на твърдата фаза, утайките са предразположени към бързо загниване с отделяне на лошо миришещи газове и привличат инсекти и гризачи на мястото на тяхното депониране или оползотворяване. Това налага те да бъдат биологично стабилизирани, т.е. да бъдат снижени в максимална степен биоразградимите органични вещества в тях. Стабилизирането на утайките и отделянето на течната от твърдата фаза са основни технологични проблеми в пречиствателните станции за отпадъчни води.

Поради значителните разходи за третиране на утайките, прилагането на един или друг технологичен подход за тяхното обезводняване трябва да бъде аргументирано както в технологичен, така и в икономически аспект. В това отношение решаващи фактори са количествените и качествените параметри на утайките, които влияят в решаваща степен върху избора на машини за обезводняване и техните технологични и технико-икономически показатели.

Енергията, необходима за разделянето на дисперсните фази на суспензията, зависи от повърхностно-активните свойства на твърдата фаза и от химичния състав на течната фаза. Поради различния химичен състав, дисперсност и повърхностно-активни свойства на твърдата фаза, енергийните връзки между дисперсните фази в първичните и активните утайки се различават чувствително. Това се отразява и върху съответните технологични параметри, свързани с процесите и съоръженията за тяхното обезводняване.

Силата на енергийните връзки между дисперсните фази в утайките, определящи възможността и разходите за тяхното разделяне, могат да бъдат количествено оценени индиректно чрез известни експериментални подходи, които са разгледани подробно в друга наша публикация [1].

Енергийните връзки между дисперсните фази зависят в значителна степен и от размера (условния диаметър d) на частичките на твърдата фаза, които характеризират т.нар. „дисперсност“ на системата. В редица изследвания се изтъква негативното влияние на финодисперсните частици върху скоростта и степента на разделяне на дисперсните фази при филтруване или в потенциално (гравитационно или центробежно) поле. Това влияние се засилва с увеличаване на тяхната фракция в суспензията. Тъй като финодисперсните частици в утайките от ПСОВ са основна част от твърдата дисперсна фаза, скоростта и степента на разделянето на такива суспензии е много малка.

Както е известно, за обезводняване на утайки от ПСОВ се използват традиционно следните два основни вида машини, чието действие се различава принципно:

- машини за разделяне на суспензии чрез филтруване през полупропускливи мембрани – вакуумфилтри и филтърпреси;
- машини за разделяне на суспензии в потенциално (центробежно) поле – утайтелни центрофуги.

2. Машини за обезводняване на утайки чрез филтруване

В санитарната техника за механично обезводняване на утайки чрез филтруване традиционно се използват барабанни вакуумфилтри и различни видове филтърпреси – камерни мембранни, лентови, шнекови. Освен специфичните конструктивни решения и особености, принципната разлика между тях е големината на налягането, при което се реализират процесите на филтруване. Това има значение при обезводняването на утайки от отпадъчни води, образуващи при филтруване кек, който се деформира лесно при хидравлично или механично натоварване.

От известните четири състояния на процесите на филтруване, при обезводняване на утайки от ПСОВ на вакуумфилтри и филтърпреси, се наблюдава изключително само това с постепенно натрупване на слой твърди частици върху филтърната мембрана – т.нар. „кек“, който действа и като филтърна преграда.

Използването на машини за обезводняване на утайки от отпадъчни води чрез филтруване хронологично се развива от доминиращо прилагане на вакуумфилтри (до 70-те години на 20 век) до постепенно налагане на филтърпресите в последващия период. Този преход в предпочитанията се дължи както на прогреса в конструкциите на филтърпресите, така и на подчертаната разлика в експлоатационните и технико-икономическите параметри на тези два основни вида машини за обезводняване в полза на филтърпресите. Независимо от това, тук накратко ще бъде представена известна информация от технологичен и технико-икономически характер и за вакуумфилтрите, тъй като те биха могли да бъдат използвани при определени обстоятелства, коментирани по-долу.

2.1. Технологични параметри на процесите на филтруване

Производителността и ефективността на машините за обезводняване чрез филтруване с образуване на филтърен кек могат да бъдат оценени количествено чрез две важни характеристики на утайките – „специфично съпротивление r “ и „коэффициент на свиваемост σ “. Тяхното определяне се извършва чрез несложни експериментални изследвания в лабораторни условия, които обикновено са налице във всяка лаборатория към ПСОВ [1].

Процесът на филтруване с образуване на кек се описва аналитично с уравнението на Рут [1, 2]:

$$\frac{1}{F} \frac{dV_{\phi}}{dt} = \frac{P}{\mu(R_k + R_{\phi M})} = \frac{P}{\mu(ar + 0)}, \quad (1)$$

където F е площта на филтърната мембрана, cm^2 ; V_{ϕ} – обемът на филтрат, отделен за време t , cm^3 ; t – времето за образуване на филтрат с обем V_{ϕ} , s ; P – налягането (респ. вакуумът) при което се извършва филтруването, MPa ; R_k – съпротивлението (напорните загуби) при филтруването през кека, отнесено към 1 cm^2 филтърна площ, cm^{-1} ; $R_k = ra$; r – специфично съпротивление на утайките по тегло, cm/g ; a – теглото на твърдата фаза в изходната суспензия с обем V_0 и концентрация X_0 , отнесено към площта на филтърната мембрана F ; $a = V_0 X_0 / F$, g/cm^2 ; с известно приближение числената стойност на a се приема равна на тази на X_0 ; $R_{\phi M}$ – съпротивлението (напорните загуби) при филтруването през филтърната мембрана, отнесено към 1 cm^2 филтърна площ, cm^{-1} ; $R_{\phi M} \approx 0$; μ – коэффициентът на динамична вискозност, $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

При интегриране на уравнение (1) се получава следният алгебричен израз:

$$V_{\phi}^2 = \frac{2PF^2}{\mu r X_0} t. \quad (2)$$

Според Люис [3] зависимостта на специфичното съпротивление r от налягането (респ. вакуума) P може да бъде представена аналитично чрез следния емпиричен израз:

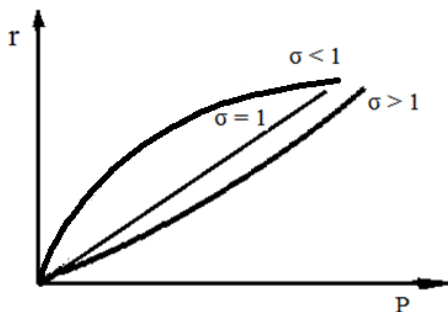
$$r = r_0 + \alpha P^{\sigma}, \text{ cm/g}, \quad (3)$$

където r_0 , α и σ са емпирични параметри; обикновено се приема $r_0 \approx 0$; P – налягането при филтруване, Ра.

Тогава изразът (2) може да бъде представен във вида (4):

$$V_{\phi}^2 = \frac{2P^{1-\sigma} F^2}{\mu \alpha X_0} t. \quad (4)$$

Параметърът σ се нарича „коэффициент на свиваемост“ на кека (или накратко – „свиваемост“). Параметърът α се нарича „коэффициент на специфично съпротивление“ на утайките. Графично той може да бъде представен като наклонът на тангентата към кривата $r = f(P)$ в началната ѝ точка (фиг. 1). Коэффициентът на специфично съпротивление α и свиваемостта σ определят големината на специфичното съпротивление във функция от налягането P .



Фиг. 1. Влияние на налягането при филтруване върху специфичното съпротивление на утайки с различни коэффициенти на свиваемост

Както личи от фиг. 1 и формула (4), при утайките с коэффициент на свиваемост $\sigma > 1$, специфичното им съпротивление нараства значително и непропорционално с нарастването на налягането при филтруване. Това показва, че обезводняването им трябва да бъде извършвано при възможно по-ниско налягане (напр. на вакуумфилтри), докато утайки с коэффициент на свиваемост $\sigma < 1$ се обезводняват по-ефективно чрез филтруване при по-високо налягане (напр. филтърпреси).

Производителността на сухо вещество на машините за обезводняване чрез филтруване – G_{ϕ} по дефиниция се определя с израза:

$$G_{\phi} = \frac{V_0 X_0}{Ft}, \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}. \quad (5)$$

Отношението β между обема на суспензията V_0 и обема на филтратата от нея V_ϕ може да бъде определено с израза (6) чрез баланса на теглото на твърдата фаза в суспензията и в кека:

$$\beta = \frac{V_\phi}{V_0} = \frac{W_y - W_k}{100 - W_k}, \quad (6)$$

където W_y е влажността на необезводнената утайка, %; W_k – влажността на обезводнената утайка (кека), %.

С отчитане на технологичните параметри на утайките и на машините за обезводняване, както и на изразите (4) и (6), след известни преобразувания, формула (5) може да бъде представена окончателно във вида [1]:

$$G_\phi = \frac{2P^{1-\sigma}(m/100)}{\mu\alpha h_k} \left(\frac{100 - W_k}{W_y - W_k} \right)^2 \frac{100 - W_y}{100 - W_k}, \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}, \quad (7)$$

където m е частта на периода на филтруване от времетраенето на работния цикъл, %; $m < 100\%$ при машините с циклично действие; $m = 100\%$ при машините с непрекъснато действие; h_k – височината (дебелината) на филтърния кек, m.

В табл. 1 са представени препоръчителни данни за височината h_k за основните видове машини за механично обезводняване на утайки от отпадъчни води при обичайните влажности на уплътнените изходни утайки и на съответните филтърни кекове.

Таблица 1

Видове машини за обезводняване	h_k , m	W_k , %
Камерни филтърпреси	0,025 – 0,032	65 – 75
Мембранни филтърпреси	0,025 – 0,032	60 – 70
Лентови филтърпреси	0,030 – 0,035	65 – 70
Вакуумфилтри	0,020 – 0,030	78 – 82

2.2. Техничко-икономически параметри на процесите на филтруване

Машините за обезводняване чрез филтруване могат да бъдат характеризирани със следните технико-икономически параметри:

- оползотворена специфична енергия – $E_{\phi,S}$, kWh/m²;

$$E_{\phi,S} = \frac{V_\phi P}{F} = \frac{V_\phi P}{F 3,6 \cdot 10^6}, \text{ kWh/m}^2. \quad (8)$$

Предвид формула (4) изразът (8), след известно преобразуване, може да бъде представен във вида:

$$E_{\phi,S} = \left(\frac{2t}{\mu\alpha X_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P^{\frac{3-\sigma}{2}}}{3,6 \cdot 10^6}, \text{ kWh/m}^2. \quad (9)$$

Тъй като ефективното време за филтруване t зависи от вида на машините за обезводняване и от вида и филтрационните свойства на утайките, то не може да бъде определено предварително. С оглед на възможността за провеждане на сравнителен анализ чрез въведените тук относителни технико-икономически критерии е уместно времето за ефективно филтруване t да бъде прието за единица, т.е. $t = 1$ h.

- Оползотворена специфична мощност – $N_{\phi,S}$, kW/m²;

$$N_{\phi,S} = \frac{E_{\phi,S}}{t} = \left(\frac{2.1}{\mu\alpha X_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P^{\frac{3-\sigma}{2}}}{1.3, 6.10^6}, \text{ kW/m}^2, \quad (10)$$

където $t = 1$ h;

- Приложена специфична мощност – $N_{\text{дв},S}$, W/m²;

$$N_{\text{дв},S} = \frac{N_{\text{дв}}}{F}, \text{ W/m}^2, \quad (11)$$

където $N_{\text{дв}}$ е общата инсталирана мощност на агрегатите към машините за обезводняване, kW;

- Коефициент на полезно действие на машината за обезводняване – η ;

$$\eta = \frac{N_{\phi,S}}{N_{\text{дв},S}} = \left(\frac{2}{\mu\alpha X_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P^{\frac{3-\sigma}{2}}}{3, 6.10^6 N_{\text{дв},S}}. \quad (12)$$

При практическото използване на горните формули трябва да се отчитат и следните обстоятелства:

- Зависимостите са изведени чрез уравнението на Рут при предпоставката за определяне на специфичното съпротивление на утайките при постоянно налягане.
- **При камерните филтърпреси** налягането нараства постепенно, достигайки максималната си стойност 1,2 – 1,5 МПа известно време след началото на филтърния цикъл. Коректното използване на горните зависимости изисква въвеждането в тях на постоянно за филтърния цикъл налягане, което може да се приеме в граници 1,0 – 1,3 МПа. Концентрацията на суспензията X_0 е постоянна, равна на тази на необезводнената (предварително уплътнена гравитационно) утайка – около 50 – 55 kg/m³ за първични утайки, 20 kg/m³ за излишни активни утайки и 55 – 60 kg/m³ за смесени утайки.
- **При лентовите и шнековите филтърпреси** налягането също нараства постепенно, достигайки максималната си стойност 0,55 – 0,75 МПа в зоната на компресиране. Коректното използване на горните зависимости изисква въвеждането и в тях на средно за фазата на компресиране налягане, което може да се приеме в граници 0,5 – 0,7 МПа. Концентрацията на суспензията X_0 в случая може да се приеме също постоянна, равна на тази на уплътнената в известна степен (в първата зона на филтърпресата) утайка в граници 45 – 50 kg/m³.

- **При вакуумфилтрите** налягането остава постоянно (обикновено $P = 0,067$ МРа) през целия цикъл на филтруване. Концентрацията на суспензията X_0 е постоянна, равна на тази на необезводнената (предварително уплътнена гравитационно) утайка – както при камерните филтърпреси.

В табл. 2 са представени обобщени данни (по информацията в публикувани фирмени каталози) за усреднени стойности на параметрите: концентрация на твърдата фаза в уплътнените утайки X_0 ; средно налягане при филтруване P ; приложена специфична мощност при филтруване $N_{дв,с}$.

Таблица 2

Основни видове машини за обезводняване на утайки	Концентрация на уплътнените утайки X_0 , kg/m^3	*Налягане при филтруване P , МРа	*Приложена специфична мощност $N_{дв,с}$, kW/m^2
Камерни филтърпреси	първични: 50 – 55 излишни активни: 20 смесени: 55 – 60	1,0 – 1,3 (1,2)	0,15 – 0,35 (0,25)
Лентови и шнекови филтърпреси	45 – 50	0,5 – 0,7 (0,65)	0,18 – 0,22 (0,20)
Вакуумфилтри	първични: 50 – 55 излишни активни: 20 смесени: 55 – 60	0,067	0,5 – 0,6 (0,55)

* На горния ред са дадени диапазоните на изменение на съответните параметри, а в скобите – техните средни или най-вероятни стойности.

Практическото приложение на представените по-горе технологични и технико-икономически критерии е илюстрирано с две примерни решения.

Пример 1. Да се избере подходяща машина за механично обезводняване на кондиционирана първична утайка с посочените в табл. 3 технологични параметри.

Таблица 3

Технологични параметри	Камерни филтърпреси	Лентови филтърпреси	Вакуум-филтри
Влажност на утайките, W_y , %	95	95	95
Влажност на филтърния кек, W_k , %	65	70	78
Температура на утайките, °C	15	15	15
Коефициент на специфично съпротивление, $\alpha \cdot 10^6$	1,14	1,14	1,14
Коефициент на свиваемост, σ	0,9	0,9	0,9
Дебелина на кека, m	0,032	0,035	0,030
Налягане при филтруване, Pa. 10^6	1,2	0,65	0,067
Процент на ефективно време за филтруване, m , %	80	100	100

Технико-икономическите параметри на машините за обезводняване чрез филтруване, получени в резултат на решенията по Пример 1, са представени в табл. 4.

Таблица 4

Технико-икономически параметри	Камерни филтърпреси	Лентови филтърпреси	Вакуум-филтри
Инсталирана специфична мощност, $N_{дв,с}$, kW/m ²	0,25	0,20	0,55
Производителност на машините, $G_{ф}$, kgCB/m ² .h	0,5	0,7	1,9
Оползотворена специфична мощност, $N_{ф,с}$, kW/m ²	0,111	0,059	0,0086
Коефициент на полезно действие, η , 100, %	44,4	29,5	1,6

При анализа на разгледаните алтернативни варианти за машини за обезводняване се открояват следните основни изводи:

- лентовата филтърпреса е със сравнително голяма производителност, но с по-нисък к.п.д.;
- камерната филтърпреса е с малко по-ниска производителност, но с по-голям к.п.д.;
- вакуумфилтърът е с най-голяма производителност, но с най-малък к.п.д.

Може да се отбележи, че получените в представения пример резултати за производителността $G_{ф}$ при съответните машини за обезводняване са достатъчно близки до тези, публикувани в специализираните издания и в каталозите на производителите за този тип утайки.

Получените в горния пример резултати са илюстративни и се отнасят до определен вид утайки с конкретни качествени параметри. Тъй като броят на качествените показатели, фигуриращи в горните зависимости, е общо 10, то са възможни множество комбинации между тях (характеризирани утайки с различни свойства), чийто брой теоретично е $10! = 3\ 628\ 800$.

Пример 2. Да се изберат подходящи машини за механично обезводняване на утайки от две пречиствателни станции за отпадъчни води – ПСОВ „А“ (некондиционирани смесени първични и излишни активни утайки) и ПСОВ „Б“ (кондиционирани смесени първични и излишни активни утайки) при изходните данни, представени в табл. 5.

Таблица 5

Технологични параметри	Утайки от ПСОВ „А“			Утайки от ПСОВ „Б“		
	Камерни филтърпреси	Лентови филтърпреси	Вакуум-филтри	Камерни филтърпреси	Лентови филтърпреси	Вакуум-филтри
Концентрация на СВ, X_0 , kg/m ³	50	50	20	50	50	20
Влажност на уплътнените утайки, W_y , %	95	95	95	95	95	95
Влажност на филтърния кек, W_k , %	65	70	78	65	70	78

Технологични параметри	Утайки от ПСОВ „А“			Утайки от ПСОВ „Б“		
	Камерни филтър-преси	Лентови филтър-преси	Вакуум-филтри	Камерни филтър-преси	Лентови филтър-преси	Вакуум-филтри
Температура на утайките, °C	15	15	15	15	15	15
Коефициент на специфично съпротивление, $\alpha \cdot 10^6$	15,72	15,72	15,72	14,93	14,93	14,93
Коефициент на свиваемост, σ	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
Дебелина на чека, m	0,032	0,035	0,030	0,032	0,035	0,030
Налягане при филтруване, Pa. 10^6	1,2	0,65	0,067	1,2	0,65	0,067
Процент на ефективно време за филтруване, m, %	80	100	100	80	100	100
Инсталирана специфична мощност, $N_{дв,с}$, kW/m ²	0,25	0,20	0,55	0,25	0,20	0,55

Технико-икономическите параметри на машините за обезводняване чрез филтруване на утайки с различни технологични параметри, получени в резултат на решенията по Пример 2, са представени в табл. 6.

Таблица 6

Технико-икономически параметри	Утайки от ПСОВ „А“			Утайки от ПСОВ „Б“		
	Камерни филтър-преси	Лентови филтър-преси	Вакуум-филтри	Камерни филтър-преси	Лентови филтър-преси	Вакуум-филтри
Производителност на машините, G_{ϕ} , kgCB/m ² .h	0,5	0,7	1,9	2,0	2,9	5,4
Оползотворена специфична мощност, $N_{дв,с}$, kW/m ²	0,015	0,008	0,002	0,031	0,017	0,003
Коефициент на полезно действие, η .100, %	6,0	4,0	0,4	12,4	8,5	0,5

При анализа на резултатите от горните два примера и формулите, на които те се базират, могат да бъдат направени следните изводи относно влиянието на технологичните и технико-икономическите параметри на утайките върху избора на подходяща машина за тяхното обезводняване:

- Производителността G_{ϕ} зависи много чувствително от комбинацията на стойностите на параметрите „налягане при филтруване“ P и „коефициент на свиваемост“ σ . При стойности на $\sigma \geq 1$ по-големите стойности на налягането P водят до по-ниски стойности на производителността G_{ϕ} . Обратно,

при стойности на $\sigma \leq 1$ по-големите стойности на налягането P водят до по-високи стойности на производителността G_{ϕ} .

- Производителността G_{ϕ} се влияе значително и от големината на специфичното съпротивление на утайките r , респективно – от параметъра „коэффициент на специфично съпротивление“ α . С увеличаването на стойността на α производителността G_{ϕ} намалява пропорционално.
- Коэффициентът на полезно действие (к.п.д.) η също зависи от комбинацията на стойностите на параметрите „налягане при филтруване“ P и „коэффициент на свиваемост“ σ , като последният влияе в по-малка степен негативно в сравнение с влиянието му върху производителността G_{ϕ} . Независимо от стойността на σ с увеличаване на налягането P коэффициентът на полезно действие η нараства, но нелинейно.
- При подходящо кондициониране и дози на реагентите (утайки със $\sigma < 1$ и ниски стойности на α) се постигат по-големи стойности на производителността G_{ϕ} и коэффициента на полезно действие η . Във всички случаи обаче вакуумфилтрите имат неприемливо ниски стойности на к.п.д. Това е една от главните причини прилагането на тези съоръжения в санитарната техника да бъде значително редуцирано. При утайки със стойности на $\sigma > 1$ и при по-високи стойности на α вакуумфилтрите имат най-голяма производителност G_{ϕ} , което в това отношение ги прави по-подходящи от филтърпресите.
- Влажността на необезводнените утайки W_y и особено тази на филтърния кек W_k влияят в определена степен върху стойностите на производителността G_{ϕ} и коэффициента на полезно действие η . По-ниските стойности на W_k водят логично до по-ниски стойности на G_{ϕ} и η .

3. Утайелни центрофуги

В различните промишлени производства са намерили приложение различни конструктивни модификации на центрофуги, които според принципа на сепариране на суспензиите, могат да бъдат отнесени към две основни групи – филтърни и утайелни центрофуги. В санитарната техника се използват утайелни центрофуги. При тях разделянето на суспензията се извършва в центробежно поле с ускорение j , което обикновено е с около 2 – 3 порядъка по-голямо от земното ускорение g . При утаяване в земното гравитационно поле отделената течна фаза се нарича „декантат“, а тази, отделена в центробежното поле на утайелна центрофуга – „фугат“ или „центрат“ (англ. “centrate”).

Всъщност няма принципна разлика в процесите на утаяване на частиците в центробежното и в земното потенциални полета, освен отношението j/g , което определя многократно по-бързото разделяне на суспензията в центробежното в сравнение със земното гравитационно поле. Това отношение се нарича „фактор на разделяне“ Fr – формула (13).

$$Fr = j / g . \quad (13)$$

3.1. Технологични параметри на процеса центрофугиране

Факторът на разделяне зависи от конструктивните и технологичните параметри на утайелните центрофуги, съгласно израза (14).

$$Fr = j / g = \omega^2 r / g = (\pi n / 30)^2 r / g, \quad (14)$$

където j е центробежното ускорение, m/s^2 ; g – земното ускорение, m/s^2 ; ω – ъгловата скорост на въртене на ротора на центрофугата, s^{-1} ; r – вътрешният радиус на цилиндричния ротор, m ; n – броят на оборотите на ротора, min^{-1} .

Освен с параметъра „фактор на разделяне“ Fr , процесът центрофугиране при утаелните центрофуги се характеризира и със следните технологични параметри [1]:

- Индекс на производителността на центрофугата Σ (или „число сигма“)

$$\Sigma = F Fr = \pi(D-2h)L \frac{(D-2h)}{2g} \left(\frac{n}{30}\right)^2 = \frac{\pi}{1800g} LDn^2(1-2h/D)^2, \quad (15)$$

където F е вътрешната цилиндрична повърхност на суспензията във въртящия се ротор на центрофугата (т.нар. „повърхност на утаяване“), m^2 ; $F = \pi(D-2h)L$, m^2 ; D – вътрешният диаметър на цилиндричния ротор на центрофугата, m ; h – височината на течния слой във въртящия се ротор, m ; L – дължината на ротора (на течния слой в него), m .

- Производителност на центрофугата – количеството на подаваната в центрофугата суспензия $Q_{ц}$

$$Q_{ц} = \beta v \Sigma, \quad m^3/s, \quad (16)$$

където β е т.нар. „коэффициент на ефективност“ (отразяващ всички неотчетени фактори в процеса центрофугиране; $\beta \approx 0,8$; v – скоростта на стеснено утаяване (т.е. уплътняване) на утайката в спокойни условия в земното гравитационно поле, m/s).

При наличие на третираната суспензия, скоростта на стеснено гравитационно утаяване v може лесно да бъде установена с несложен експеримент. Ако тези условия не са налице, скоростта v може да бъде определена по емпирични данни, публикувани в техническата литература. Според Весилинд [3] и редица други автори скоростта на стеснено гравитационно утаяване на активна утайка зависи от концентрацията на твърдата фаза в суспензията съгласно израза:

$$v = a \exp(-kX_y), \quad m/s, \quad (17)$$

където a е емпиричен параметър, m/s ; $a = 3 - 10$ m/s ; k – емпиричен параметър, l/g ; $k = 0,3 - 0,6$ l/g ; X_y – концентрацията на твърдата фаза в утайката, kg/m^3 .

- Количество на отделената утайкова вода (т.нар. „фугат“) – $Q_{ф}$, m^3/s

$$Q_{ф} = \frac{\gamma_y}{\gamma_{ф}} Q_y \left(1 - \frac{100 - W_y}{100 - W_k}\right), \quad m^3/s, \quad (18)$$

където $\gamma_{ф}$ е обемното тегло на фугата, kg/m^3 ; $\gamma_{ф} \approx 1000$ kg/m^3 ; γ_y – обемното тегло на утайката, kg/m^3 ; за първични утайки $\gamma_y \approx 1050$ kg/m^3 ; за излишни активни утайки $\gamma_y \approx 1005$ kg/m^3 ; W_y – влажността на утайката, подавана на входа на центрофугата, %; W_k – влажността на обезводнената утайка (кека), %;

- Времетраене на центрофугирането – T , h

$$T = V_y / 3600Q_{ц}, \text{ h}, \quad (19)$$

където V_y е обемът на утайките, подавани за обезводняване, m^3 .

- Концентрация на суспендираните вещества във фугата на изхода на центрофугата X_e

$$X_e = (1 - \eta) X_0 \frac{\gamma_{\phi} (100 - W_{\kappa})}{\gamma_y (W_y - W_{\kappa})}, \text{ kg/m}^3, \quad (20)$$

където η е степента на задържане на твърдата фаза при центрофугирането; $\eta \approx 0,9 - 0,95\%$.

- Интегрален параметър на свойствата на утайките (Integral Property Parameter – IPP)

Този показател е предложен през 1997 г. от Неленшулте и Кайзер [4] и се отнася само за определяне на пределната (най-ниската) влажност на обезводнените утайки, която може да бъде постигната чрез центрофугиране в центробежно поле с ускорение $900g$.

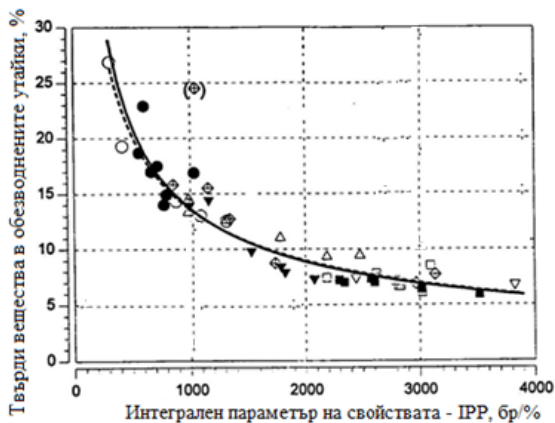
Параметърът IPP обединява на емпирична основа следните характеристики на утайките:

- концентрацията на суспендираните вещества – SS ;
- процентното съдържание на органичните суспендирани вещества – VSS – т.нар. „загуби при наляване“ („annealing loss“ – AL), %;
- дисперсността (в случая – количеството на финодисперсната фаза, оценявана чрез сумарния брой $spec.Q_{0(3,9)}$ на фините частици с размери в интервала $1,9 - 3,9 \mu\text{m}$);
- плътността на твърдата фаза – ρ_{ss} ;
- отношението ϕ на теглата на твърдите фази в излишната активна утайка и в смесените първична и излишна активна утайки (при обезводняване на смесени утайки); при обезводняване отделно на излишна активна утайки $\phi = 1$, а на първична утайка $\phi = 0$.

Неленшулте и Кайзер предлагат следната по-опростена емпирична формула за определяне на обобщената характеристика на утайките IPP , в която липсват някои от изброените по-горе характеристики на суспензията, които трудно могат да бъдат определени в конвенционалните лабораторни условия:

$$IPP = AL^{(1+\phi)}, \text{ бр/\%}. \quad (21)$$

Връзката между параметъра IPP и максималното процентно съдържание на твърдата фаза в обезводнените утайки, която може да бъде постигната чрез центрофугиране, е представена графично на фиг. 2 [4].



Фиг. 2. Емпирична графична зависимост между обобщения параметър IPP и пределното процентно съдържание на твърдата фаза в обезводнените чрез центрофугиране утайки [4]

3.2. Техничко-икономически параметри на утаителните центрофуги

Утаителните центрофуги могат да бъдат характеризирани със следните технико-икономически параметри:

- Оползотворена мощност – $N_{ц,о}$

$$N_{ц,о} = Q_{ф} \gamma_{ф} L 9,81 / 1000, \text{ kW}; \quad (22)$$

- Приложена мощност (по каталог) – $N_{ц,дв}$, kW;

- Коефициент на полезно действие – η

$$\eta = N_{ц,о} / N_{ц,дв}; \quad (23)$$

- Времетраене на центрофугирането – T

$$T = V_y / 3600 Q_{ц}, \text{ h}; \quad (24)$$

- Приложена енергия – $E_{ц}$, kWh

$$E_{ц} = N_{ц,дв} T, \text{ kWh}; \quad (25)$$

- Оползотворена енергия – $E_{ц,о}$

$$E_{ц,о} = E_{ц} \eta, \text{ kWh}. \quad (26)$$

Практическата приложимост на технико-икономическите параметри на центрофуга, избрана за обезводняване на утайки с определени технологични параметри, е илюстрирана тук с примерно решение.

Пример 3. Да се определят основните технологични и технико-икономически параметри на утаителна центрофуга за обезводняване на стабилизирани смесени първична и излишна активна утайка при следните изходни данни:

- обем на утайките подлежащи на обезводняване, $V_y = 300 \text{ m}^3$;
- отношение между масите на твърдите вещества в излишната активна утайка и в първичната утайка, $\phi = 0,8$;

- съдържание на органични вещества в утайките, $O_{\text{орг}} = 55\%$;
- влажност на утайките, подавани в центрофугата, $W_y = 97\%$;
- влажност на обезводнените утайки (кека), $W_k = 85\%$;
- скорост на стеснено утаяване (уплътняване) на утайките в спокойни (статични) условия, $v = 2,9 \cdot 10^{-5}$, m/s;
- процент на задържане на суспендираните вещества при центрофугирането, $\alpha = 95\%$;
- височина на течния слой в цилиндричната част на ротора (височина на пръстеневидния преливник) $h = 0,15$ m;
- коефициент на ефективност на центрофугирането $\beta = 0,8$;
- концентрация на суспендираните вещества в утайката, $X_y = 30$ kg/m³;
- обемното тегло на утайката, $\gamma_y = 1030$ kg/m³;
- обемното тегло на фугата, $\gamma_f \approx 1000$ kg/m³;
- обемното тегло на твърдата фаза, $\gamma_k = 1250$ kg/m³;
- обороти на центрофугата $n = 2200$ min⁻¹;
- диаметър на ротора $D = 0,65$ m;
- дължина на ротора $L = 2,85$ m;
- приложена мощност на центрофугата $N_{\text{ц,дв}} = 120$ kW.

Технико-икономическите параметри на избраната утаителна центрофуга, получени в резултат на решенията по Пример 3, са представени в табл. 7.

Таблица 7

Параметри	Мярка	Стойности
Индекс на производителността, Σ	m ²	1528,2
Количество на фугата, Q_f	m ³ /h	81,7
Производителност на центрофугата, $Q_{\text{ц}}$	m ³ /h	127,8
Специфична производителност на центрофугата, $G_{\text{ц,с}}$	kg/m ² .h	1343,8
Концентрация на суспендираните вещества във фугата, X_e	kg/m ³	1,5
Интегрален параметър на свойствата на утайките, IPP	бр/%	1357,2
Отчетено (фиг. 2) процентно съдържание на твърдата фаза в кека, X_k	%	12
Оползотворена специфична мощност, $N_{\text{ц,о}}$	kW/m ²	0,046
Коефициент на полезно действие, 100η	%	0,121
Времетраене на центрофугирането, T	h	2,35
Оползотворена специфична енергия, $E_{\text{ц,о}}$	kWh/m ²	0,109
Приложена специфична енергия, $E_{\text{ц,с}}$	kWh/m ²	90,04

В табл. 8 са представени сравнителни данни за технико-икономическите параметри на машините за обезводняване чрез филтруване и утайтелната центрофуга, третиращи кондиционирана смесена първична и излишна активна утайка с определени технологични параметри, представени в горните примери.

Таблица 8

Технико-икономически параметри	Камерна филтърпреса	Лентова филтърпреса	Вакуум-филтър	Утайтелна центрофуга
Инсталирана специфична мощност, $N_{дв,S}, \text{kW/m}^2$	0,25	0,20	0,55	38,31
Специфична производителност, $G_{\phi}, \text{kgCB/m}^2.\text{h}$	0,5	0,7	1,9	1343,8
Оползотворена специфична мощност, $N_{o,S}, \text{kW/m}^2$	0,111	0,059	0,0086	0,0463
Коефициент на полезно действие, $\eta_{100}, \%$	12,4	8,5	0,5	12,1
Специфична вложена енергия, $E_{\text{спец}}, \text{kWh/kgCB}$	0,125	0,069	0,102	0,0445

В последния ред на табл. 8 са представени стойностите на технико-икономическия показател „специфична вложена енергия“ $E_{\text{спец}}$ за задържане на 1 kg сухо вещество (CB) от кондиционираните утайки с параметри съгласно табл. 6. Този параметър се определя с израза:

$$E_{\text{спец}} = N_{дв,S} / G_{\phi}, \text{ kWh/kgCB}, \quad (27)$$

където $N_{дв,S} = N_{дв} / F, \text{ kW/m}^2$;

F – активната площ на филтърната мембрана (при машините за обезводняване чрез филтруване) или площта на свободната (вътрешната) повърхност на ротиращата течност (при центрофугите), m^2 .

При центрофугите параметърът G_{ϕ} се определя по формулата:

$$G_{\phi} = Q_{ц} X_0 / F, \text{ kg/m}^2.\text{h}. \quad (28)$$

От данните в табл. 8 се вижда, че камерните филтърпреси имат най-голяма специфична вложена енергия, докато при лентовите филтърпреси и центрофугите тя е значително по-малка. Най-малка е специфичната вложена енергия при центрофугите, което свидетелства за тяхната подчертана ефективност по отношение на този показател.

4. Основни изводи и заключение

В конкретния случай, предвид гореизложените зависимости примерни решения и анализи, могат да бъдат направени следните основни изводи относно обоснования избор на машини за обезводняване на утайки от отпадъчни води с конкретни технологични показатели и параметри на утайките:

- Центрофугите имат около 190 пъти по-голяма инсталирана мощност от тази на лентовите филтърпреси, които са с най-ниска стойност на този показател при машините за обезводняване чрез филтруване.

- Центрофугите имат около 707 пъти по-голяма специфична производителност при твърдо вещество в сравнение с вакуумфилтрите, които са с най-висока стойност на този показател при машините за обезводняване чрез филтруване.
- Оползотворената специфична мощност на центрофугите е съизмерима с тази на лентовите филтърпреси. Тя е около 2,4 пъти по-малка от тази на камерните филтърпреси (които са с най-висока стойност на този показател при машините за обезводняване чрез филтруване), но около 5,4 пъти по-висока от тази при вакуумфилтрите.
- Коефициентът на полезно действие на центрофугите е почти същият като този на камерните филтърпреси (които са с най-висока стойност на този показател при машините за обезводняване чрез филтруване), около 1,4 пъти по-голям от този на лентовите филтърпреси и 24,2 пъти по-голям от този на вакуумфилтрите.
- В конкретния случай центрофугите имат най-малки специфични разходи на електроенергия, отнесени към единица тегло на сухото вещество в утайките в сравнение с машините за обезводняване чрез филтруване. От последните най-малки специфични разходи $E_{\text{спец}}$ имат лентовите филтърпреси, които по този показател се доближават до центрофугите.

Трябва да се отбележи, че освен споменатите по-горе енергийни разходи, при калкулирането на общите експлоатационни разходи трябва да бъдат отчетени и амортизационните отчисления (които за центрофугите обикновено са по-големи), както и разходите за реагенти. При сравнителния анализ трябва да се има предвид, че при еднакви изходни данни за количеството и свойствата на третираните утайки, стойностите на лентовите филтърпреси и на центрофугите са почти равни, както дозите за кондициониране на утайките и съответното реагентно стопанство.

Представените тук технологични и технико-икономически параметри, както и направените анализи, илюстрират възможността за по-обоснован и мотивиран избор на машина за обезводняване на утайки от отпадъчни води с конкретни свойства. При липса на възможност за лабораторен анализ на техните технологични характеристики (напр. във фазата на проектиране), могат да бъдат използвани съответните обобщени параметри, представени в друга наша публикация [1] – таблици VII.1.1.2, VII.3.2.4 и VII.3.2.5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсов, Р., Драганов, Др., Костова, И., Колева-Симеонова, М. Проектиране на пречиствателни станции за отпадъчни води. Техника, 2017, ISBN: 987-954-03-0708-4.
2. Ruth, B. F. Studies in Filtration. Ph.D. Thesis, University of Minnesota, USA, 1931.
3. Vesilind, P. A. Design of Prototype Thickeners from Batch Settling Tests. // Water & Sewage Works, 115, 7, 1968: 302 – 307.
4. Nellenschulte, T., Kayser, R. Change of Particle Structure of Sewage Sludges During Mechanical and Biological Processes with Regard to the Dewatering Results. // Water Science & Technology, 36, 4, 1997: 293 – 306.

WELL-GROUNDED SELECTION FOR SEWER SLUDGE DEWATERING MACHINES

R. Arsov¹

Keywords: sludge, WWTP, dewatering

ABSTRACT

Two kinds of dewatering machines, which differ principally in their performance: machines employed membrane filtration and sedimentation centrifuges, are traditionally used in sanitary engineering for sewer sludge treatment at wastewater treatment plants (WWTPs).

Usually selection of one or other sewer sludge dewatering machine is based on unclear stated preferences for its kind and manufacturer. The main reason for this is the fact that the commonly used criteria are not enough and they don't fully respect the sewer sludge quality parameters as well as some important technical and economic characteristics of the dewatering machines.

This paper discusses suitable technological criteria for selection of dewatering machines utilizing membrane filtration, quantitatively assessed taking into account two important sludge characteristics – “specific filtration resistant r ” and “coefficient of filtration cake deformability σ ”. The technological parameters of sedimentation centrifuges dewatering sewer sludge with definite settling characteristics are discussed as well. Technical and economic criteria are suggested for sewer sludge dewatering machines, taking into account the energy and power employed, as well as the associated coefficient of efficiency while dewatering sludge with definite filtration and/or sedimentation characteristics. Practical implementation of suggested criteria is illustrated by relevant examples.

Suggested technological, technical and economic criteria, as well as the associated analyses, allow more adequate and motivated selection of dewatering machines treating sewer sludge with definite technological characteristics.

¹ Roumen Arsov, Prof. Dr. Eng., Dept. “Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: rv_arsov@abv.bg