

АННОТАЦИЯ

В статье приводится метод прогнозирования общих и удельных расходов электроэнергии в технологических системах водоотведения при изменении качества очистки и объёма стоков. Метод базируется на построении многофакторных регрессионных моделей, учитывающих взаимосвязь между электропотреблением, объёмами перекачанных стоков, температурой наружного воздуха, количеством выпавших атмосферных осадков и химическим составом стоков. Результаты исследований могут быть использованы организациями жилищно-коммунального хозяйства, оказывающими услуги водоотведения, для планирования общих и удельных расходов электроэнергии и оценки энергоэффективности.

ANNOTATION

The article establishes a method of predicting the general and specific energy consumption in technological systems of sewage and storm water disposal when the quality of cleaning and total flow change. The method is based on the construction of multivariate regression models that take into account the interconnection of power consumption, capacity of pumped sewer, the outside temperature, amount of precipitation and chemical composition of the flow. The results of scientific research can be used by organizations of housing and communal services, providing wastewater services, for planning general and specific energy consumption and evaluation of energy efficiency state.

Прогнозирование показателей энергоэффективности технологических систем водоотведения при изменении качества очистки и объёма стоков

Н. В. Грунтович, д. т. н., профессор, ООО «Центр научно-прикладных проблем энергетики», Гомель

А. А. Капанский, м. т. н., аспирант, ассистент кафедры электроснабжения Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого

Введение

Системы городского водоотведения представляют собой сложные технические комплексы, основной функцией которых является перекачка хозяйственно-бытовых, промышленных и дождевых стоков с целью их очистки от загрязнений и дальнейшего возвращения в водоёмы. В соответствии с Водным кодексом Республики Беларусь от 30.04.2014 № 149-З предприятиям водопроводно-канализационного хозяйства (ПВКХ) устанавливаются нормативы допустимых сбросов химических и иных веществ в поверхностные водные объекты.

Контроль качества очистки сбрасываемых сточных вод осуществляются территориальными органами Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, которое ежегодно устанавливает широкий перечень целевых показателей, способствующих повышению качества

очистки стоков, и необходимых для реализации Протокола по проблемам воды и здоровья к Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озёр 1992 года (принят в Лондоне 17 июня 1999 г.). К таким задачам относятся: увеличение обеспеченности населения централизованными и местными системами водоотведения; сокращение объёмов недостаточно очищенных сточных вод (со степенью очистки менее 90 %).

Технологически выполнение установленных нормативов допустимых сбросов химических и прочих веществ в водоёмы требует включения дополнительного воздухоудовного оборудования или увеличения загрузки существующего, что, как правило, приводит к невыполнению целевых показателей по энергосбережению. Существующие методы расчёта показателей энергоэффективности (ЭЭФ) основываются на анализе режимов работы единичных электроприёмников, а не системы в целом и не учитывают реальные условия функционирования предприятий. В результате этого сотрудники ПВКХ испытывают сложности выполнения всех доведённых нормативов. Кроме того, возникшая неопределённость в оценке показателей ЭЭФ усложняется при изменении формирующих электропотребление факторов [1].

Авторы предлагают решение актуальной задачи по разработке метода прогнозирования ЭЭФ в зависимости от изменений качества очистки и объёма стоков на основе многофакторного моделирования электропотребления и трансформации параметров модели после изменения влияющих условий.

Математические модели электропотребления в системе водоотведения

Основой прогнозирования показателей ЭЭФ, то есть определения фактической величины общего и удельного расхода ЭЭ на перекачку и очистку стоков в заданном периоде (квартал, год и др.), является построение моделей электропотребления в зависимости от воздействующих факторов, которые базируются на обработке статистических данных методами регрессионного анализа. В информационную базу этих данных входит суточная статистика ретроспективных производственных показателей, то есть фактических показателей прошедшего периода, что позволяет учесть реальное изменение объёмов производства, климатические особенности региона, количество выпавших атмосферных осадков, химические показатели стоков, а также фактические затраты ЭЭ при их транспортировке [1, 2, 3].

Отличие итоговой модели электропотребления для различных систем транспорта и очистки стоков заключается в отсутствии или наличии автоматизированной подачи кислорода в аэротенки. В последнем случае в модель включаются факторы, отражающие изменение химического состава стоков, поступающих к месту очистки. Химические факторы будут также значимы, если процесс подачи кислорода осуществляется в ручном режиме и совпадает с общей динамикой загрязнения сточных вод [3].

Таким образом, в зависимости от способа регулирования подачи воздуха в аэротенки предлагаемая авторами модель электропотребления может быть представлена [3, 4]:

- ♦ для предприятий с неавтоматизированным процессом очистки стоков:

$$W = w_{\text{YA-TEK}} \cdot Q_{\text{СТОК}} + a \cdot t_{\text{НАР}} + b \cdot N_{\text{ОСАД}} + W_{\text{УСА.П.}} \quad (1)$$

где $w_{\text{YA-TEK}}$ — технологический фактор модели, характеризующий удельный технологический расход ЭЭ на транспортировку и очистку стоков, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{тыс. м}^3$;

$Q_{\text{СТОК}}$ — суточный объём стоков, тыс. м^3 ;

a — коэффициент регрессии температурного фактора, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/^\circ\text{C}$;

$t_{\text{НАР}}$ — температура наружного воздуха, $^\circ\text{C}$;

b — коэффициент регрессии фактора количества выпавших осадков, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{мм}$;

$N_{\text{ОСАД}}$ — количество выпавших осадков, мм ;

$W_{\text{УСА.П.}}$ — свободный член регрессии, характеризующий условно-постоянный расход ЭЭ, не зависящий от формирующих электропотребление факторов, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$;

- ♦ для предприятий при наличии ручного или автоматизированного регулирования подачи воздуха в аэротенки:

$$W = w_{\text{YA-TEK}} \cdot Q_{\text{СТОК}} + a \cdot t_{\text{НАР}} + b \cdot N_{\text{ОСАД}} + W_{\text{ХИМ}} + W_{\text{УСА.П.}} \quad (2)$$

где $W_{\text{ХИМ}}$ — затраты электроэнергии, обусловленные изменением химического состава стоков, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$, определяются по формуле:

$$W_{\text{ХИМ}} = c \cdot \text{ХПК} + d \cdot \text{БПК}_5 + e \cdot \text{NH}_4 \quad (3)$$

где ХПК, БПК₅ и NH₄ — химические показатели сточных вод, $\text{мг}/\text{л}$;

c, d, e — коэффициент регрессии перед факторами ХПК, БПК₅ и NH₄ соответственно, $(\text{кВт}\cdot\text{ч})\cdot\text{л}/\text{мг}$.

В общем виде модель электропотребления может быть представлена в виде суммы технологических, условно-постоянных и прочих влияющих факторов:

$$W = w_{\text{YA-TEK}} \cdot Q_{\text{СТОК}} + a \cdot x_2 + b \cdot x_3 + \dots + e \cdot x_j + W_{\text{УСА.П.}} = W_{\text{ТЕХ}} + W_{\text{П.Ф.}} + W_{\text{УСА.П.}} \quad (4)$$

где $x_2, x_3 \dots x_j$ — факторные признаки модели электропотребления, не связанные с технологическим фактором;

$a, b \dots e$ — коэффициенты регрессии модели перед факторами соответственно;

j — количество формирующих электропотребление факторов;

$W_{\text{ТЕХ}}$ — технологический расход ЭЭ, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$;

$W_{\text{П.Ф.}}$ — расход ЭЭ, обусловленный включением в модель прочих факторов, не связанных с технологическими, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$.

Модель удельного расхода ЭЭ, отнесённая к объёмам сточных вод, представляется зависимостью [5]:

$$w_{\text{YA}} = w_{\text{YA-TEK}} + \frac{a \cdot x_2 + b \cdot x_3 + \dots + e \cdot x_j + W_{\text{УСА.П.}}}{Q_{\text{СТОК}}} = w_{\text{YA-TEK}} + \frac{W_{\text{П.Ф.}} + W_{\text{УСА.П.}}}{Q_{\text{СТОК}}} \quad (5)$$

Основным фактором, формирующим условно-постоянный расход ЭЭ в системе водоотведения, является непрерывная работа воздухоудного оборудования, доля которого достигает 80 % [5]. Улучшение качества очистки стоков сопровождается дополнительной нагрузкой воздухоудов, что в свою очередь приводит к росту условно-постоянной составляющей электропотребления $W_{\text{усл.п.}}$, которая изменяет характеристику удельного расхода ЭЭ. Для корректировки зависимости (5) предлагается определять прирост подачи кислорода в аэротенки и соответственно вызванный этим прирост электропотребления. Расчёт потребности в кислороде (кг/сут) определяется суммой расхода воздуха на деструкцию органических веществ и нитрификацию с учётом снижения потребности в кислороде за счёт окисления органических веществ при денитрификации по формуле [6]:

$$OV = OV_C + OV_N - OV_D, \quad (6)$$

где OV_C — расход кислорода на деструкцию органических веществ, *кг/сут*;

OV_N — расход кислорода на нитрификацию, *кг/сут*;

OV_D — снижение потребности в кислороде за счёт окисления органических веществ при денитрификации, *кг/сут*.

Алгоритм расчёта удельного расхода ЭЭ при изменении качества очистки и объёма стоков

Предлагаемый метод прогнозирования показателей ЭЭФ описывается следующим алгоритмом.

1. Определяется расход кислорода на обработку сточной воды OV_C (кг/сут) с целью деструкции по формуле [6]:

$$OV_C = V_{\text{сут}} \cdot \left(0,56 + \frac{0,15 \cdot a_1 \cdot 1,072^{(t_{\text{сток}}-15)}}{1 + 0,17 \cdot a_1 \cdot 1,072^{(t_{\text{сток}}-15)}} \right), \quad (7)$$

где $V_{\text{сут}}$ — суточное поступление биохимически разлагаемых веществ на очистные сооружения, *кг/сут*;

$t_{\text{сток}}$ — температура стоков, °C;

a_1 — доза ила, *г/дм³*, для сооружений с предварительным отстаиванием и очисткой с нитрификацией и денитрификацией, принимается 3,0 *г/дм³*.

2. Определяется суточное поступление биохимически разлагаемых веществ $V_{\text{сут}}$ на очистные сооружения по формуле [6]:

$$V_{\text{сут}} = Q_{\text{сток}} \cdot L_{\text{ен}}, \quad (8)$$

где — БПК₅ сточных вод, поступающих на биологическую очистку, *мг/дм³*.

3. Определяется потребность в кислороде на нитрификацию OV_N (кг/сут) по формуле [6]:

$$OV_N = Q_{\text{сток}} \cdot \frac{4,3 \cdot (C_{\text{NO}_3\text{D}} - C_{\text{NO}_3\text{en}} + C_{\text{NO}_3\text{ex}})}{1000}, \quad (9)$$

где $C_{\text{NO}_3\text{D}}$ — концентрация нитратного азота, подлежащего денитрификации, *мг/дм³*;

$C_{\text{NO}_3\text{en}}$ — концентрация нитратного азота в сточных водах, поступающих на сооружения биологической очистки, *мг/дм³*;

$C_{\text{NO}_3\text{ex}}$ — концентрация нитратного азота в очищенных сточных водах, отводимых от сооружений биологической очистки (от вторичных отстойников), *мг/дм³*.

4. Определяется снижение потребности кислорода OV_D (кг/сут) за счёт окисления органических веществ при денитрификации по формуле [6]:

$$OV_D = Q_{\text{сток}} \cdot \frac{C_{\text{NO}_3\text{D}}}{1000}. \quad (10)$$

5. Пересчитывается массовый суточный расход кислорода в объёмный $Q_{\text{кисл}}$ (*м³/сут*) по формуле:

$$Q_{\text{кисл}} = \frac{OV_C + OV_N - OV_D}{1,429}, \quad (11)$$

где 1,429 — масса 1 *м³* газообразного кислорода, *кг*.

6. Определяется растворимость кислорода воздуха в сточной воде C_p (*мг/л*) по формуле [7, 8]:

$$C_p = C_T \cdot \frac{10,3 + 0,5 \cdot H}{10,3}, \quad (12)$$

где H — глубина погружения аэратора, *м*;

C_T — растворимость кислорода воздуха в чистой воде, *мг/л*, при давлении 0,1 МПа описывается уравнением, полученным в результате полиномиальной аппроксимации табличных величин, приведённых в [7]:

$$C_T = 0,004 \cdot t_{\text{сток}}^2 - 0,35 \cdot t_{\text{сток}} + 14,43. \quad (13)$$

7. Рассчитывается требуемая суточная подача воздуха Q_B (*м³/сут*) с учётом количества аэротенков, растворимости кислорода в сточной воде и его содержания в атмосферном воздухе (при нормальных условиях принимается 20,9 %):

$$Q_B = Q_{\text{кисл}} \cdot n \cdot \frac{C_p}{C_p - C_0} \cdot \frac{1}{0,209}, \quad (14)$$

где n — количество аэротенков, *шт*;

C_0 — средняя концентрация кислорода в аэротенке, *мг/л*, принимается равной 2 *мг/л*.

8. Определяется прирост электропотребления $\Delta W_{в}$, обусловленный необходимостью дополнительной подачи кислорода в аэротенки:

$$\Delta W_{в} = k_{и} \cdot (P_2 - P_1) \cdot T = k_{и} \cdot \Delta P \cdot T, \quad (15)$$

где $k_{и}$ — коэффициент использования воздушного оборудования, *отн. ед.*;

P_2 — мощность компрессорной станции после повышения качества очистки стоков, *кВт*;

P_1 — мощность компрессорной станции до повышения качества очистки стоков, *кВт*;

ΔP — прирост мощности после повышения качества очистки стоков, *кВт*;

T — число часов работы оборудования в периоде прогнозирования, *ч.*

9. Полученные затраты ЭЭ в прогнозируемом периоде приводятся к суточному уровню дискретизации:

$$\Delta W_{усл.п}^B = \Delta W_{в} / N, \quad (16)$$

где N — количество дней в прогнозируемом периоде, *сут.*

10. Осуществляется корректировка условно-постоянной составляющей модели (5) по формуле:

$$W'_{усл.п} = W_{усл.п} + \Delta W_{усл.п}^B, \quad (17)$$

В случае, когда потребность в кислороде уменьшается, расчёты производятся аналогично, при этом условно-постоянный параметр модели корректируется отрицательным приростом $\Delta W_{усл.п}^B$.

11. Определяется прогнозируемое значение удельного расхода ЭЭ по формуле:

$$W'_{уа} = w_{уа,тех} + \frac{Q_{сток}}{Q_{п.ф.} + W'_{усл.п}} = w_{уа,тех} + \frac{W_{п.ф.} + W'_{усл.п}}{Q_{сток}}, \quad (18)$$

Блок-схема расчёта удельного расхода ЭЭ при изменении качества очистки стоков приведена на рис. 1.

Применение метода на практике

Рассмотрим возможность использования предложенного метода на примере системы водоотведения Жлобина (КЖУП «Уником»), в которой удельный расход ЭЭ (*кВт·ч/тыс.м³*) за 2014 г. описывается зависимостью:

$$w_{уа} = w_{уа,тех} + \frac{W_{п.ф.} + W_{усл.п}}{Q_{сток}} = 74,8 + \frac{-4,1 \cdot t_{нар} + 5266,8}{Q_{сток}}$$



Рис. 1. Блок-схема расчёта удельного расхода ЭЭ при изменении качества очистки и объёмов стоков

На 29 сентября 2014 г. нормируемое значение азота общего по разрешению на специальное водопользование составило 15,0 мг/дм³. Концентрация нитратного азота C_{NO_3D} , подлежащего денитрификации, установлена на уровне 22,5 мг/дм³. Концентрация нитратного азота в сточных водах, поступающих C_{NO_3en} и отводимых C_{NO_3ex} от сооружений биологической очистки, полученная по информации испытательной лаборатории Уникома, составила 0,66 мг/дм³ и 21,8 мг/дм³ соответственно. Среднесуточный расчётный объём сточных вод, поступающих на очистку, принят в 31 500 м³/сут.

Массовый расход кислорода на нитрификацию OV_N (*кг/сут*) согласно формуле (9) составит:

$$OV_N = 31500 \cdot \frac{4,3 \cdot (22,5 - 0,66 + 21,8)}{1000} = 5911,04 \text{ кг/сут.}$$

Объёмный расход кислорода, поступающего в аэротенки на нитрификацию, определяется по формуле (11):

$$Q_{\text{кисл}} = 5911,04/1,429 = 4136,49 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Растворимость кислорода воздуха в чистой воде согласно (13) при температуре стоков $t_{\text{сток}} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$ в аэротенках первой очереди очистных сооружений составляет 8,33 мг/л. Растворимость кислорода воздуха в чистой воде в аэротенках второй очереди при $t_{\text{сток}} = 17,75 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет 9,48 мг/л.

Растворимость кислорода воздуха в сточной воде в аэротенках первой и второй очередей определяется по формуле (12) и при глубине погружения аэратора 3 м составит:

$$C_{\text{рI}} = 8,83 \cdot \frac{10,3 + 0,5 \cdot 3}{10,3} = 9,55 \text{ мг/л.}$$

$$C_{\text{рII}} = 9,48 \cdot \frac{10,3 + 0,5 \cdot 3}{10,3} = 10,86 \text{ мг/л.}$$

Среднее значение растворимости кислорода в воде аэротенков очистных сооружений составит:

$$C_{\text{р}} = (9,55 + 10,86)/2 = 10,203 \text{ мг/л.}$$

Требуемая суточная подача воздуха определяется по формуле (14):

$$Q_{\text{в}}^{\text{сут}} = 4136,49 \cdot 5 \cdot \frac{10,203}{10,203 - 2} \cdot \frac{1}{0,209} = 123087 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Подача воздуха, приведённая к часовому уровню дискретизации:

$$Q_{\text{в}}^{\text{ч}} = 123087/24 = 5129 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

На 25 марта 2014 г. нормируемое значение азота общего по разрешению на специальное водопользование составило 35,0 мг/дм³. Концентрация нитратного азота $C_{\text{NO}_3\text{D}}$, подлежащего денитрификации, установлена на уровне 17,85 мг/дм³. Концентрация нитратного азота в сточных водах, поступающих $C_{\text{NO}_3\text{en}}$ и отводимых $C_{\text{NO}_3\text{ex}}$ от сооружений биологической очистки, составила 0,46 мг/дм³ и 14,6 мг/дм³ соответственно. Среднесуточный расчётный расход сточных вод, поступающих на очистку, принят в 31 500 м³/сут.

Массовый расход кислорода на нитрификацию составит:

$$OV_{\text{N}} = 31500 \cdot \frac{4,3 \cdot (17,85 - 0,46 + 14,6)}{1000} = 4333,05 \text{ кг/сут.}$$

Объёмный расход кислорода на нитрификации:

$$Q_{\text{кисл}} = 4333,05/1,429 = 3032,22 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Требуемая суточная подача воздуха:

$$Q_{\text{в}}^{\text{сут}} = 3032,22 \cdot 5 \cdot \frac{10,203}{10,203 - 2} \cdot \frac{1}{0,209} = 90228 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Подача воздуха, приведённая к часовому уровню дискретизации:

$$Q_{\text{в}}^{\text{ч}} = 90228/24 = 3760 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Согласно полученным расчётам за период с 25 марта 2014 г. по 29 сентября 2014 г. потребность в кислороде на нитрификацию увеличилась на 1 369 м³/ч (5 129 – 3 760). При этом суммарная подача воздуха в аэротенки увеличилась с 6 317 м³/ч до 7 686 м³/ч (6 317 + 1 369). При расходе 6 317 м³/ч фактическая мощность воздуходувок составляет $P_1 = 130$ кВт. Согласно паспортным данным при мощности 330 кВт производительность воздуходувки равна 16000 м³/ч. Поскольку функциональная зависимость изменения КПД воздуходувки от режимов работы отсутствует, то прирост мощности будет определяться путём линейной интерполяции существующих величин:

$$P_2 = 130 + \frac{7686 - 6317}{16000 - 6317} \cdot \frac{330 - 130}{1} = 158,28 \text{ кВт.}$$

Прирост мощности составит:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 158,28 - 130 = 28,28 \text{ кВт.}$$

Годовой прирост затрат ЭЭ на работу воздуходувок определяется по формуле (17):

$$\Delta W_{\text{в}} = 1 \cdot 28,28 \cdot 8760 = 247\,732,8 \text{ кВт/год.}$$

По формуле (16) осуществляется переход от годового прироста электропотребления к суточному уровню дискретизации:

$$\Delta W_{\text{усл.п}}^{\text{в}} = \Delta W_{\text{в}}/N = 247732,8/365 = 678,72 \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут.}$$

Корректировка условно-постоянной составляющей модели электропотребления производится по формуле (17):

$$W'_{\text{усл.п}} = 5266,8 + 678,72 = 5945,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Прогнозируемый расход ЭЭ (кВт·ч) предлагается определять по формуле:

$$W'_{\text{ЭЭ}} = w_{\text{уд.тех}} \cdot Q_{\text{сток}} + (a \cdot t_{\text{нар}} + W'_{\text{усл.п}}) \cdot N \quad (19)$$

Тогда при увеличении качества очистки и снижении объёмов обработки стоков с 11 048 до 6 043 тыс. м³/год годовой расход ЭЭ Уникома составит:

$$W'_{\text{ЭЭ}} = [74,8 \cdot 6043 + (-4,1 \cdot 7,4 + 5945,5) \cdot 365] \cdot 10^{-3} = 2611 \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч.}$$

Прогнозируемое значение удельного расхода ЭЭ составит:

$$w'_{\text{УА}} = 2611 / 6043 \cdot 1000 = 432 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/1000 \text{ м}^3.$$

Характеристика удельного расхода ЭЭ системы водоотведения Уникома при изменении внешних и внутренних воздействий приведена на рис. 2.

Таким образом, для ПВКХ «Уником» нормируемое значение азота общего выросло с 15,0 мг/дм³ до 35,0 мг/дм³, что привело к увеличению расхода воздуха компрессорной станцией на 1369 м³/ч и, соответственно, условно-постоянной составляющей — на 678,72 кВт·ч/сут. В свою очередь удельный расход ЭЭ вырос с 248 до 270 кВт·ч/тыс. м³. Однако наибольшее влияние оказало резкое снижение объёмов производства, в результате чего итоговый удельный расход ЭЭ возрос на 74 % до 432 кВт·ч/тыс. м³.

Выводы

Разработанный метод, основанный на корректировке условно-постоянной составляющей общего и удельного расхода электроэнергии, обусловленной дополнительной загрузкой воздухоудовного оборудования в результате прироста подачи кислорода в аэротенки, позволяет учитывать изменение объёмов и качества очистки стоков при прогнозировании показателей энергоэффективности технологических систем водоотведения.

Метод может использоваться жилищно-коммунальными организациями, оказывающими услуги водоотведения при планировании электропотребления, а также для обоснования роста удельного расхода ЭЭ при снижении объёмов производства и изменении качества очистки стоков. ЭИМ

Литература

1. Грунтович Н. В. Развитие методического обеспечения диагностирования и прогнозирования энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, Д. Р. Мороз, А. А. Капанский // Энергоэффективность. — 2015. — № 3. — С. 20–23.
2. Грунтович Н. В. Экспериментальные методические рекомендации по расчёту норм расхода ТЭР в системах водоснабжения и водоотведения Республики Беларусь / Н. В. Грунтович, Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // под. ред. зам. Министра жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь А. В. Шагуна. — Мн., 2015. — 97 с.

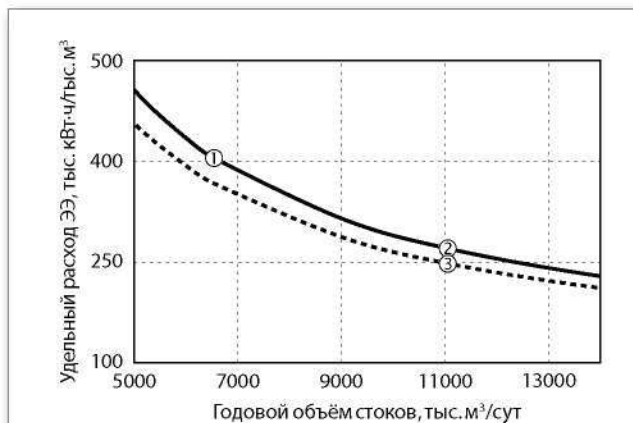


Рис. 2. Прогнозирование удельного расхода при изменении потребности в кислороде и снижении объёмов производства на очистных сооружениях Жлобина (КЖУП «Уником»):
 1 — $w_{\text{УА}} = 432 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{тыс. м}^3$ при $Q = 6043 \text{ тыс. м}^3$ и увеличении качества очистки стоков и снижении объёмов производства;
 2 — $w_{\text{УА}} = 270 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{тыс. м}^3$ при $Q = 11048 \text{ тыс. м}^3$ и увеличении качества очистки стоков;
 3 — $w_{\text{УА}} = 248 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{тыс. м}^3$ при $Q = 11048 \text{ тыс. м}^3$ и сохранении качества очистки стоков.

3. Капанский А. А. Управление энергоэффективностью трубопроводных систем водоотведения на основе многофакторного моделирования режимов электропотребления // Агротехника и энергообеспечение. — 2016. — № 1 (10). — С. 51–63.
4. Грунтович Н. В. Расчётно-статистический метод оценки показателей энергоэффективности в технологических системах водоотведения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции. А. Б. Дарьенков (отв. ред.). — Нижний Новгород, 2015. — 145–150 с.
5. Грунтович Н. В. Влияние внешних и внутренних факторов на формирование удельных и общих расходов электроэнергии в системах городского водоотведения Республики Беларусь / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Энергия и Менеджмент. — 2016. — № 3. — С. 24–30.
6. ТКП-45-4.01-202-2010 «Очистные сооружения сточных вод».
7. Ласков Ю. М. и др. Примеры расчётов канализационных сооружений: Учеб. пособие для вузов/ Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов, В. И. Калицун. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1987. — 255 с.: ил.;
8. Грунтович Н. В. Расчётно-аналитический метод нормирования расходов электрической энергии в технологических системах водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // «Вестник» ГГТУ им. П. О. Сухого. — Гомель. — 2015. — № 2. — С. 70–79.