



СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ ОСАДКОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

А. А. Мушенкова, студентка,
e-mail: annamushenkova@gmail.com

С. В. Юрков, доц.,
e-mail: sergej.yurkov@klgtu.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

Рассматривается вопрос использования твердого осадка биологической очистки сточных вод в качестве биоэнергетического ресурса. Произведено стохастическое моделирование таких энергетических характеристик илового осадка, как элементный состав и теплота сгорания илового топлива. Получены графические зависимости распределения плотности вероятности составов илового осадка по доле углерода в нем и распределения теплоты сгорания, графики достижимых диапазонов эксплуатационных мощностей.

твердый осадок биологической очистки сточных вод, избыточный активный ил, элементный состав, теплота сгорания топлива, мощность

Согласно оценкам экспертов, Калининградская область обладает высоким биоэнергетическим потенциалом и реальными возможностями его использования в качестве дополнительного ресурса топливно-энергетического комплекса [1]. Одним из видов биотоплива в регионе является биомасса городского происхождения, к которой относятся твердые осадки биологической очистки сточных вод.

Использование биомассы городского происхождения предполагает создание автономных теплоэнергетических комплексов (АТК), расщепленных по территории региона, для получения биогаза, тепловой и электрической энергии, а также экологически чистых удобрений для сельского хозяйства.

Такой АТК может быть создан на базе АО «ОКОС» (объединённые канализационно-водопроводные очистные сооружения курортной группы городов) в пос. Заостровье Зеленоградского района.

На площадке очистных сооружений данного предприятия производится биологическая очистка сточных вод курортной зоны с последующим сбросом очищенных стоков в Балтийское море. В этом процессе для нас представляет интерес избыточный активный ил, оседающий в отстойниках. Иловый осадок поступает в шнековые сгустители на уплотнение, затем обезвоживается на ленточных пресс-фильтрах, после чего направляется на площадки компостирования и далее используется в качестве удобрения [2].

В силу сложности процессов образования конечной органической массы в ходе биологической очистки сточных вод решать задачи проектирования АТК для энергетической утилизации невозможно, так как неизвестен химический состав органики, следовательно, неизвестны и физико-химические свойства топлива.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования [3-4] позволяют оценить начальный диапазон состава, но в реальных условиях этот элементный состав органической массы формируется случайным образом с учётом многих случайных факторов. Вместе с тем случайный состав не позволяет однозначно определить расчётные значения теплофизических характеристик топлива, которые, в свою очередь, также зависят от случайных факторов.

Задачи, связанные с подобными ограничениями, решаются методами стохастического моделирования, позволяющего учитывать влияние более одного случайного фактора.

Первой задачей исследования стало выявление закономерностей формирования состава органической массы. Для описания использовались методы математической статистики.

В системе «Pascal ABC.NET» была создана программа, генерирующая составы горючей массы с учётом ряда факторов: элементы состава находятся каждый в своём диапазоне (С – 44-75,8%, Н – 5,6-8,2%, S – 0,9-2,7%, О – 12,5-43,2%, N – 3,3-9,8%) [3-4], их сумма – в пределах 100% с точностью выбора от 0,005 до 10 %. Таким образом, была сгенерирована выборка различных составов, включающая от 100 до 5000 наборов элементных составов органической массы.

Далее эти наборы элементных составов группировались в интервалы по значению концентрации углерода (С, %), рассчитывались число составов в интервале и затем вероятность появления заданного состава в определённом диапазоне (число составов в интервале ко всему числу сгенерированных составов). Для каждого случая были построены графики распределения плотности вероятности (Р) элементного состава с произвольной концентрацией углерода (рис. 1 – 4).

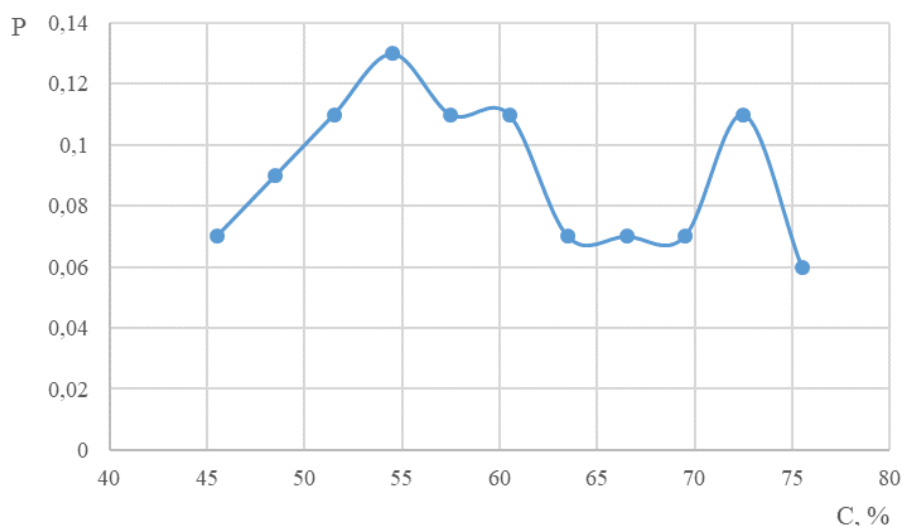


Рисунок 1 – График распределения плотности вероятности составов илового осадка (100 наборов элементных составов, точность выбора 0,005%)

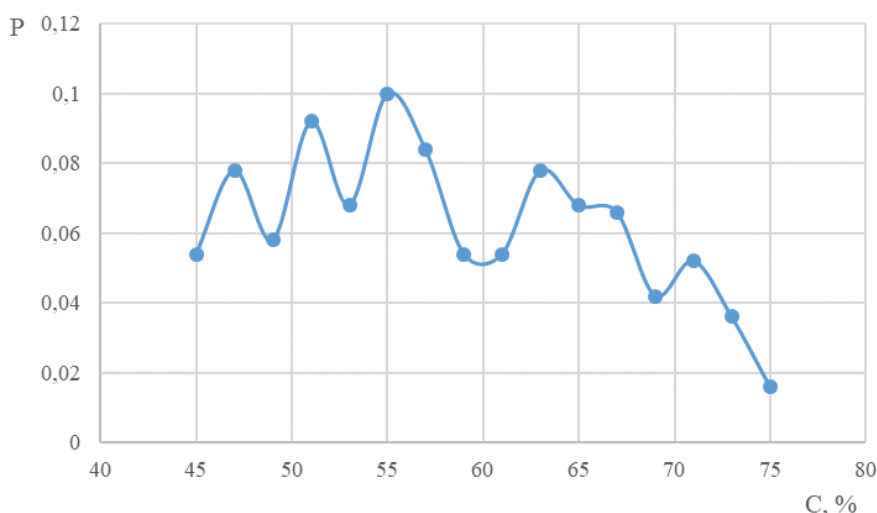


Рисунок 2 – График распределения плотности вероятности составов илового осадка (500 наборов элементных составов, точность выбора 1%)

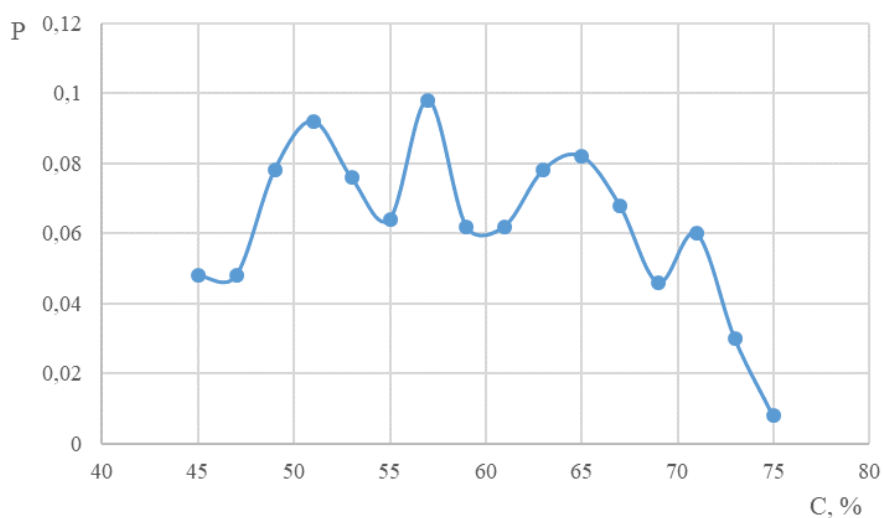


Рисунок 3 – График распределения плотности вероятности составов илового осадка (500 наборов элементарных составов, точность выбора 0,5%)

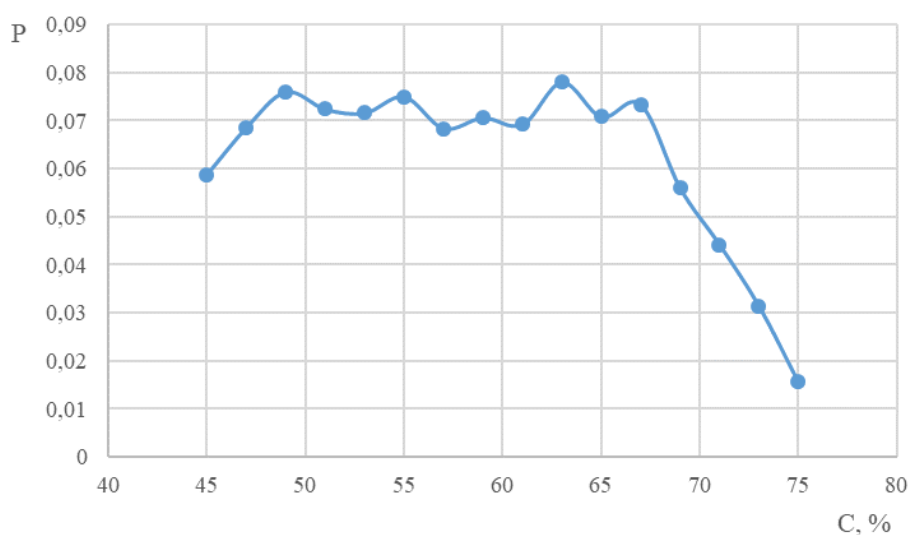


Рисунок 4 – График распределения плотности вероятности составов илового осадка (5000 наборов элементарных составов, точность выбора 5%)

Характерной особенностью полученных распределений является явно выраженный монотонный характер графика плотности распределения при высоких значениях концентрации углерода. По нашему мнению, этот эффект обусловлен исключительно методологией группировки данных в этой области значений концентраций углерода (много углерода, мало возможных комбинаций для остальных компонентов).

На начальном этапе исследования выдвигалось предположение, что результатом взаимного влияния генерируемых случайных величин в процессе формирования элементарного состава органической массы твердого осадка сточных вод будет нормальный закон распределения плотности вероятности элементарного состава. Качественный и количественный анализ распределений показал, что такая гипотеза не верна. Более того, не подтвердилась ни одна из гипотез соответствия полученных распределений описанным стандартным.

На наш взгляд, причина заключается в первую очередь в недостаточной представительности выборки, которая, согласно практическим рекомендациям математиков, должна содержать не менее 500000 исследуемых случайных величин.

В данной ситуации было принято решение отобразить распределение составов по доле углерода (рис. 5) полиномиальным уравнением второй степени (1), описывающим ап-

проксимирующую кривую, полученную в программе «Microsoft Excel» с достоверностью аппроксимации 0,8586:

$$P = -0,0782 \cdot C^2 + 8,97 \cdot C - 218,9, \quad (1)$$

что позволило выполнить расчёты значений теплоты сгорания Q моделируемого вещества по формуле Д. И. Менделеева (2):

$$Q_H^P = 339 \cdot C^P + 1025 \cdot H^P - 108,5 \cdot (O^P - S^P) - 25 \cdot W^P, \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

в том числе при различных значениях влаги в рабочей массе W^P , %: 0, 10, 35 и 65; и значении зольности сухой массы $A^c = 25\%$ [2].

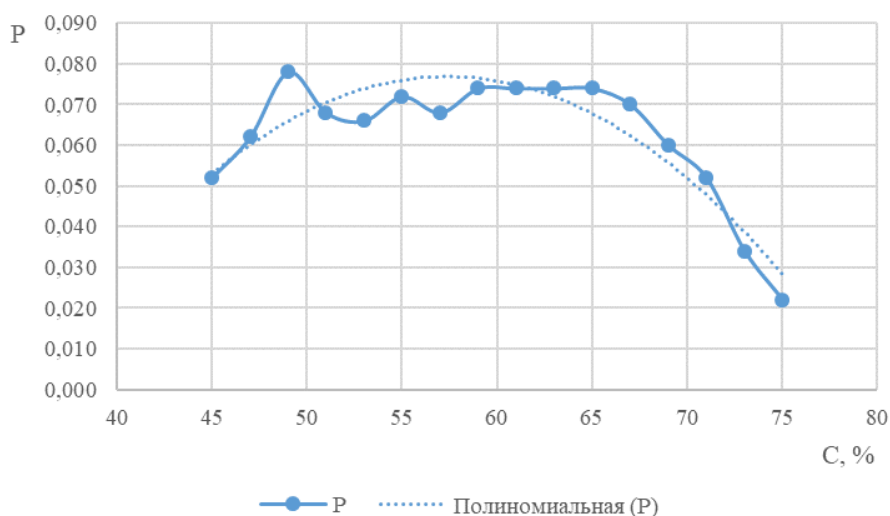


Рисунок 5 – График распределения плотности вероятности составов илового осадка (500 наборов элементарных составов, точность выбора 5%)

Значения влагосодержания обуславливаются известными фактами – доля влаги в рабочей массе в пределах до 60-65% позволяет сжигать осадок исключительно на специальных установках, 35% - на мусоросжигательных установках, а осадок, высушенный до 90% по сухому веществу, сопоставим по теплотворной способности с бурым углём и может быть использован в качестве топлива для генерации тепла и (или) электроэнергии [5]; 0% влаги – идеальные теоретические условия.

Для полученных значений теплоты сгорания как производной случайной величины рассчитаны вероятности и построены графики распределения плотности вероятности ($P = f(Q)$) (рис. 6).

Конечной целью данного этапа исследования является выяснение не только степени влияния элементарного состава образующейся случайным образом органической массы на её теплоту сгорания, но и влияния переменного характера массовых расходов сточных вод в рамках сезонной неравномерности на технически реализуемый энергетический потенциал органической массы этих стоков, т. е. корреляции между химическим составом и массовым расходом.

При проведении численного моделирования такого взаимного влияния для каждого значения влагосодержания были выбраны равновероятные значения теплоты сгорания (исключены выбивающиеся из равновероятного ряда крайние левые и правые значения, при которых кривая распределения плотности вероятности ($P = f(Q)$) возрастает и убывает соответственно). В качестве расчетных значений теплоты сгорания использовались абсолютные минимальное и максимальное значения.

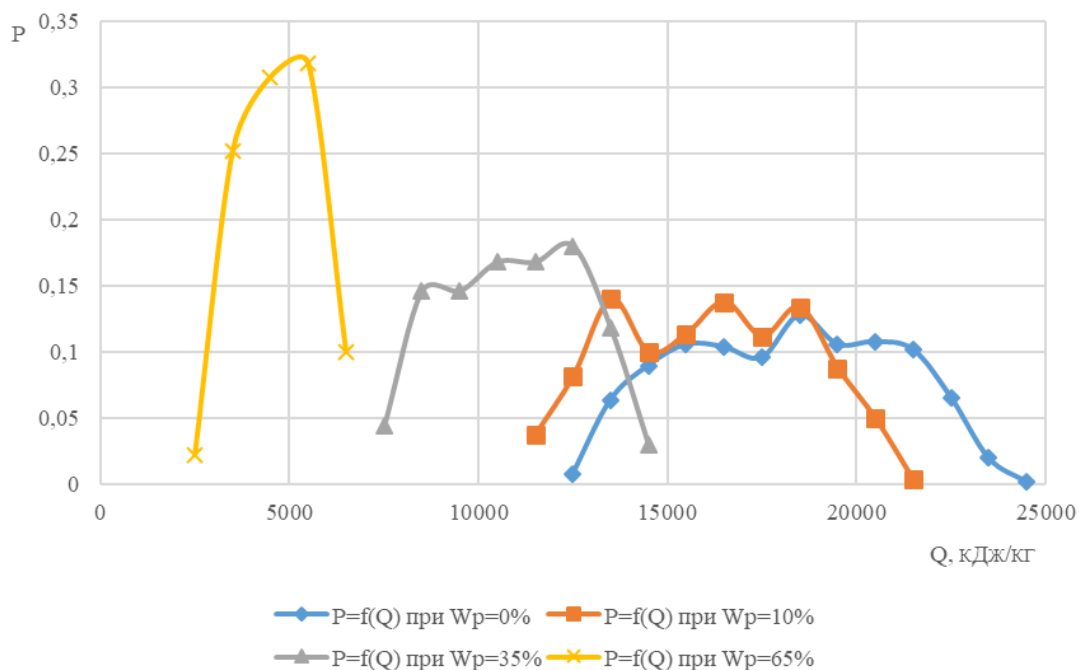


Рисунок 6 – График распределения плотности вероятности значений теплоты сгорания (500 наборов элементарных составов)

В результате численного моделирования получена зависимость теплоты сгорания от концентрации углерода (рис. 7), которая имеет линейный характер – аппроксимирующей прямой соответствует линейное уравнение (3) с достоверностью аппроксимации 0,9075:

$$Q = 214,38 \cdot C + 1647,3. \quad (3)$$

Кроме того, были сопоставлены графики распределений плотностей вероятности составов илового осадка и значений его теплоты сгорания (рис. 8), откуда видно их подобие друг другу, что доказывает правильность выбора концентрации углерода в качестве основного параметра, определяющего энергетические характеристики илового осадка.

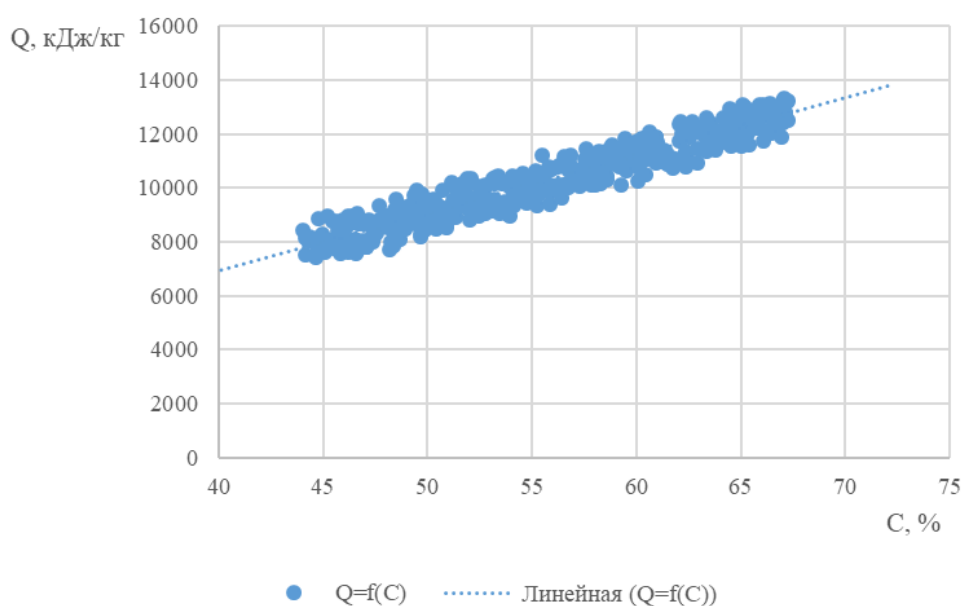


Рисунок 7 – График зависимости значений теплоты сгорания илового осадка от доли углерода в его составе

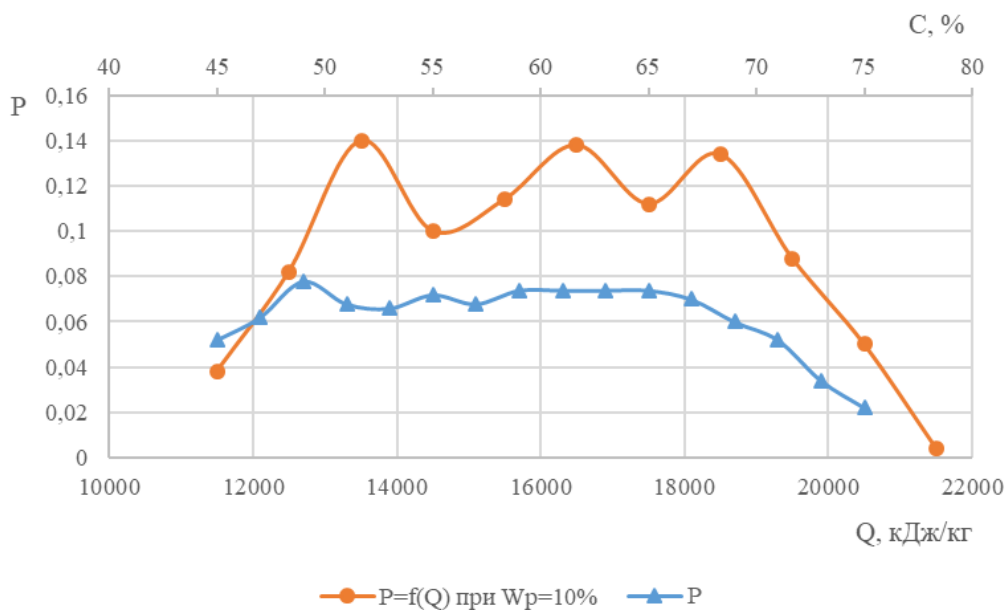


Рисунок 8 – Графики распределений плотностей вероятностей составов илового осадка и значений его теплоты сгорания

На основании данных предприятия (АО «ОКОС») за 2017 г. были рассчитаны месячные расходы избыточного активного ила с заданной влажностью, теплотворная способность илового осадка и располагаемая мощность, генерируемая при использовании илового осадка в качестве топливного ресурса. При применении избыточного активного ила в качестве сырья в производстве топлива для газотурбинных установок (ГТУ), двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и котельных установок с заданными значениями коэффициентов полезного действия (КПД) рассчитаны значения предельно достижимой эффективной мощности N соответствующих теплоэнергетических установок (ТЭУ).

Расчетные значения достижимой мощности сопоставлены с показателями расходов электроэнергии на технологические нужды предприятия (рис. 9).

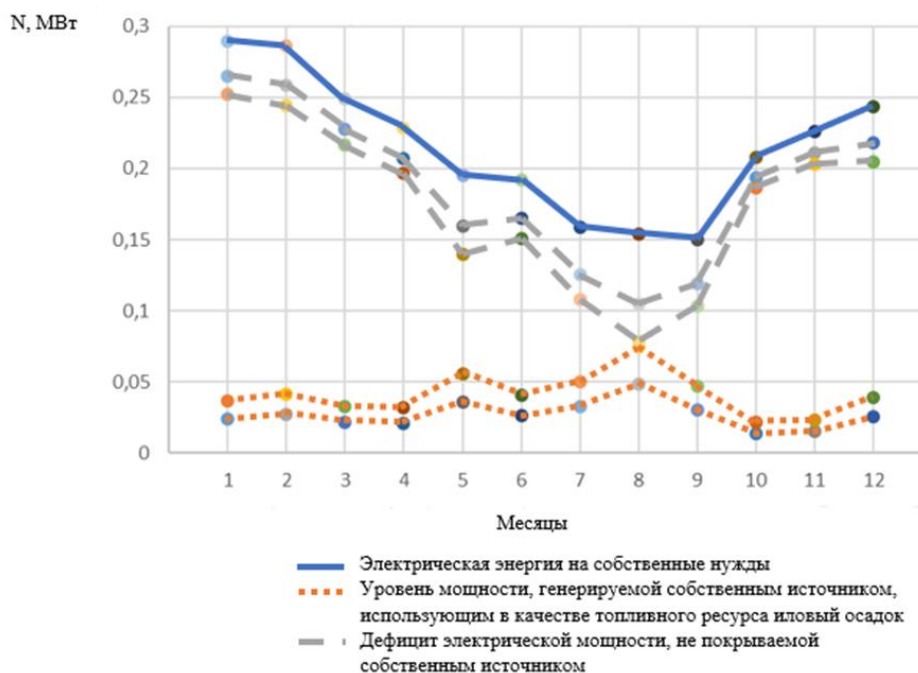


Рисунок 9 – График значений мощностей по месяцам 2017 г. при использовании ГТУ с КПД = 32%

На основании полученных данных рассчитан диапазон вероятных колебаний средних эксплуатационных нагрузок топливоиспользующих энергетических установок в каждом месяце, вызванных неравномерностью расходов и химического состава органической массы твердого осадка. Расчетный диапазон колебаний нагрузки одинаков для разных типов ТЭУ при фиксированном значении влагосодержания. При $W_p = 0\%$ диапазон рабочих нагрузок составляет от 36 до 56,3 %; при $W_p = 10\%$ - 34,8-53,4 %; при $W_p = 35\%$ - 38,1-61,7 %; при $W_p = 65\%$ - 49,7 – 98,9 %. Согласно правилам технической эксплуатации, колебания рабочих нагрузок для ГТУ должны составлять не более 10-12 % от номинальной мощности, для ДВС – не более 10%.

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Получаемой энергии от использования илового осадка в качестве топлива достаточно лишь для частичного обеспечения электроэнергией собственных нужд предприятия АО «ОКОС» (в среднем от 7 до 16 %, а в мае, летние месяцы и сентябре за счёт увеличенных расходов осадка – от 18 до 30 % от расхода электроэнергии);

2. Иловый осадок в качестве «потокового» топлива для ГТУ и ДВС применять недопустимо из-за несоответствия колебаний рабочих нагрузок правилам технической эксплуатации (колебания мощностей от 35 до 99 %, вызванные неравномерностью состава и неравномерностью подачи топливного ресурса).

Основной практической задачей, вытекающей из проведенного исследования, становится разработка методов стабилизации энергетических характеристик илового топлива и технологий его энергетического использования в рамках различных энерготехнологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селин, В. В. Теоретические и прикладные аспекты распределенной энергетики Калининградской области на базе местных и возобновляемых топливно-энергетических ресурсов. Примеры разработки инновационных теплоэнергетических технологий и установок / С. В. Юрков, Е. А. Беркова // VI Международный Балтийский морской форум: материалы (3-6 сент. 2018 г.) [Электронный ресурс]: в 6-ти т. – Т. 2. «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», VI Международная научная конференция. – Электрон. Дан. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2018. – С. 331-344

2. АО «ОКОС». Очистные сооружения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://okos39.ru/>.

3. Обработка осадков городских сточных вод: учеб. пособие / Л. Р. Хисамеева [и др.]. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2016. – 105 с.

4. Общие принципы переработки отходов с извлечением их энергетического потенциала на основе плазменных технологий. 2. Газификация иловых осадков станций водоочистки / В. А. Жовтянский [и др.] // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2016. - № 3. – С. 25-42.

5. Долина, Л. Ф. Осадки питьевых и сточных вод: проблемы и решения: моногр. / Л. Ф. Долина, П. Б. Машихина. – Днепропетровск: Изд-во «Континент», 2014. – 213 с.

STOCHASTIC MODELING OF SOLID PRECIPITATE'S ENERGY CHARACTERISTICS AFTER BIOLOGICAL SEWAGE TREATMENT

A. A. Mushenkova, student,
e-mail: annamushenkova@gmail.com
S. V. Yurkov, Associate Professor,
e-mail: sergej.yurkov@klgtu.ru
Kaliningrad State Technical University

The issue of using solid precipitate after biological sewage treatment as a bioenergy resource is being considered in the article. Stochastic modeling of activated sludge's energy characteristics (elementary composition and heat of combustion) was performed. Graphic dependence of the probability distribution of sludge sediment compositions on the proportion of carbon in it, graphic dependence of the probability distribution of heat of combustion and graphs of achievable power range were done.

biological sewage treatment solid precipitate, activated sludge, elementary composition, heat of combustion, power