

# Комплексное компостирование бытовых отходов городского хозяйства

## Complex composting of household waste urban economy

### **Луканин А.В.**

д-р техн. наук, профессор, д-р технических наук, профессор, Российский университет дружбы народов, г. Москва  
e-mail: lukanin@bk.ru

### **Lukanin A.V.**

Doctor of Engineering, professor, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow  
e-mail: ukanin@bk.ru

### **Васильева Т.**

магистр, Российский университет дружбы народов, г. Москва  
e-mail: vasi-ta@yandex.ru

### **Vasilieva T.**

Master's Degree Student, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russian Federation  
e-mail: vasi-ta@yandex.ru

### **Аннотация**

Вопросы утилизации твердых бытовых отходов выходят на первое место в деятельности предприятий жилищно-коммунального хозяйства. В частности, к этим отходам относятся подрешеточный продукт мусоросортировочных заводов (пищевые отходы), спилов деревьев, осадки сточных вод станций аэрации. В то же время второй из актуальных проблем, препятствующих дальнейшему благоустройству крупных городов, является деградация почв и истощение их естественного плодородия. Метрополисы нуждаются в постоянном обновлении своих почв. Целесообразно использование искусственной почвы, имеющей все компоненты для жизни растений и микробиоты, а также необходимую физическую структуру.

**Ключевые слова:** бытовые отходы, утилизация, деградация почв, компостирование.

### **Abstract**

Issues of utilization of solid household waste come to the first place in the activities of enterprises of housing and communal services. In particular, this waste includes sub-grid product of waste sorting plants (food waste), tree cuts, sewage sludge from aeration stations. At the same time, the second of the current problems that impede the further improvement of large cities is soil degradation and depletion of their natural fertility. Metropolitan areas need to constantly update their soils. It is advisable to use artificial soil having all the components for plant life and microbiota, as well as the necessary physical structure.

**Keywords:** household waste, recycling, soil degradation, composting

Нами разработана технология, позволяющая использовать указанные твердые бытовые отходы и получать полноценные компосты, которые можно использовать как органическое удобрение, либо как основной компонент при приготовлении искусственных почв. Спо-

соб приготовления компоста запатентован [1]. Технология предусматривает компостирование в аэрируемых буртах с поддержкой основных технологических параметров. При формировании буртов используют различные композиции из материалов, составляющих исходное сырье для компостирования. Это (из расчета на сухое вещество) – 20–40% сброженной в метантенках смеси осадков сточных вод и избыточного активного ила, 5–20% выбранных из группы: сырой осадок сточных вод, избыточный активный ил, смесь сырого осадка сточных вод и избыточного ила. Осадки городских сточных вод являются ценным сырьем, на 40% состоящим из гумусовых веществ и их предшественников. До 15% древесной щепы размером 10–30 мм позволяет связать и закрепить на подстилочном грунте мелкодисперсные компоненты искусственной почвы и обеспечить доступ воздуха в зону корневой системы растений. И порядка 25–45% подрешеточной фракции твердых бытовых отходов (пищевые отходы) – продукты питания, утратившие свои первоначальные потребительские свойства. Технологической схемой производства (рис. 1) предусмотрено грохочение готового компоста и возврат непереработанной щепы и части компоста (ускорение начала термофильной части процесса) в «голову» процесса. Время компостирования составляет 3–4 недели. Учитывая, что в процессе компостирования 1 кг органического вещества при распаде выделяется в среднем 21 мДж теплоты, которая составляет львиную долю в тепломассообмене этого процесса и которую необходимо снимать, а так же учитывая, что одним из основных условий успешного компостирования является обеспечение компостируемой массы кислородом, стехиометрическая потребность в котором составляет 2 кг на 1 кг окисленного органического вещества была принята схема компостирования в буртах с принудительной аэрацией. Аэрация в количестве 15–20 м.куб./час на 1 т органического вещества начинается со второй недели закладки буртов и продолжается до готовности компоста в режиме 7–8 часов через 3–4 суток. Содержание кислорода и углекислого газа в компостируемой смеси лежит в пределах 10–15% и 6–8% соответственно. Отношение углерода к азоту C:N = 25-30, азота к фосфору N:P = 70-95. Выход готового продукта по влажной массе 40–50% от исходной. Размер частиц не превышает 50 мм. Готовый компост имеет влажность 45–50%, содержание органических веществ 50–70%, рН = 7-9, при отсутствии патогенных организмов, яиц гельминтов и личинок мух. При выборе производительности установки приняли, что ежедневное количество осадка сточных вод составляет 300 т. После прохождения через фильтр-пресс его объем значительно уменьшается (до 65 т). По разработанной технологии смешиваются компоненты в следующих пропорциях (массовая доля в смеси): осадки сточных вод после фильтр-пресса (30% – 65 т), подрешеточная фракция ТБО (40% – 87 т), древесно-растительные отходы (20% – 43,5 т), активный ил после вторичных отстойников (10% – 21,5 т), осадки после первичных отстойников (10% – 21,5 т). Общая масса М – 238,5 т. Бурт в сечении представляет собой равнобедренную трапецию. При нижнем основании 2 м, угле естественного откоса (55°) и высоте бурта 1 м, верхнее основание будет равно 0,38 м. Длину бурта принимаем 100 м. Объем каждого бурта по расчету составляет 119 м<sup>3</sup>, масса, при плотности компоста 250 кг/м<sup>3</sup> – 29 750 кг, следовательно, количество буртов 8 шт.

**Основные конструктивные решения установки.** При разработке основных конструктивных решений особое внимание уделялось простоте и удобству эксплуатации установки компостирования. Была выбрана параллельная схема размещения восьми буртов, связанных общим коллектором подачи аэрирующего воздуха с возможностью их одновременной аэрации, либо с возможностью отсечки от коллектора любого количества буртов. При этом система аэрации была спроектирована таким образом, что конструктивно возможно использовать эту систему для подачи пара с целью обогрева буртов в холодное время года. Бурты располагаются в специально спроектированных ложах из бетона, в которых по всей длине вблизи днища размещены жёстко закреплённые перфорированные трубы для подачи воздуха или пара. После установки системы аэрации она накрывается защитным устройством, выполненным из металлических просечно-сжатых листов, на котором располагается компостный бурт. Эти листы препятствуют попаданию составляющих компоста на перфорированные

трубы и забиванию их отверстий. Также днища бетонных лож имеют форму, обеспечивающую сток избытка влаги в дренажную систему, проложенную вдоль буртов. Для этого они имеют небольшие поперечные уклоны к периферии. Перед формированием буртов на просечно-сжатые листы насыпают слой древесной щепы толщиной 200–300 мм. Сверху бурты покрываются слоем готового просеянного компоста толщиной также 200–300 мм. Эта делается с целью предотвращения теплопотерь, устранения неприятного запаха и распространения мух. Для обслуживания буртов между ними произведена засыпка щебнем фракцией 20–40 мм толщиной слоя 300 мм. Размеры технологической площадки составляют 30×105 м.

**Исходные данные для тепломассообменного расчёта.** Биодegradация ингредиентов, составляющих компостируемую массу, приводит к потере примерно 30–40% органического вещества в виде углекислого газа и воды [2, 3, 9]. Поэтому при расчетах принимаем, что при начальной массе компостируемого материала 100%, конечная масса составит 60%. Удаляемая часть компоста, в соответствии с технологическим регламентом просеивается и остаток используется в качестве рециркулирующей добавки. Принимаем [4] количество непереработанной щепы за один цикл компостирования, равным 30%. Поскольку разрабатываемая установка планируется к внедрению в первую очередь в Московском регионе, то принимаем следующие температуры и влажности воздуха: лето: +18°C,  $\varphi = 70\%$ , зима: -10,8°C,  $\varphi = 88\%$  (5).

**Материальный баланс процесса (в расчёте на 1 погонный метр бурта).** Известно, что удельная теплота парообразования для воды при 20°C составляет 2446,9 кДж/кг [5]. Однако с учетом теплопотерь и нагревания материала на испарение 1 кг влаги нужно затратить в среднем 4 МДж теплоты [4]. То есть энергии, выделяющейся при разложении 1 кг органического вещества, хватит для испарения 5 кг влаги. Кроме того, часть влаги из осадка удаляется за счет естественного испарения. Количество испарившейся жидкости с поверхности бурта составит [7]  $g_B = F \times k \times \beta \times (p_H - p_B)$  кг/ч, где:  $\beta$  – коэффициент испарения, м/ч;  $k$  – коэффициент пропорциональности. Учитывая, что данная формула справедлива для испарения с зеркала жидкости, а в нашем случае вода распределена во всем объеме компостируемой массы, а так же сверху бурта лежит защитный слой готового компоста (толщиной 30 см), который препятствует испарению воды, в формулу ввели поправочный коэффициент  $\kappa = 0,001$ .  $F$  – свободная поверхность испарения, м<sup>2</sup>,  $p_H$  – парциальное давление пара у поверхности испаряющейся воды, кг/м<sup>2</sup>;  $p_B$  – парциальное давление пара в воздухе, кг/м<sup>2</sup>. Для определения коэффициента испарения  $\beta$  обычно применяют критериальное выражение [7]  $Nu' = A Re^m Gr^n Pr^o Gu^p$ . По условиям процесса компостирования выбираем случай свободной конвекции. Тогда коэффициенты  $m$  и  $p$  будут равны нулю [7]. Соответственно, критерии Рейнольдса и Гухмана в расчетах не учитывали.

Процесс биотермического разложения органического вещества включает 3 стадии: фазу нарастания температуры, фазу высоких температур (50–75°C) и фазу падения температуры. Поэтому, чтобы значения критериев Грасгофа и Прандтля получились более достоверными, их рассчитывали для нескольких диапазонов температур в десять градусов и потом усредняли результаты. По результатам расчетов усредненные критерии Грасгофа и Прандтля равны  $3,964 \times 10^{10}$  и  $1,143 \times 10^{-8}$ , соответственно. Критерий Нуссельта определили из соотношения

$$Nu' = 0,065 \times (3,964 \times 10^{10})^{0,248} \times (1,143 \times 10^{-8})^{0,248} = 0,065 \times 424,95 \times 0,011 = 0,296$$

$$Nu' = \frac{\beta l}{D} \Rightarrow \beta = \frac{Nu' \times D}{l} = \frac{0,296 \times 0,086}{1} = 0,025 \text{ м/час.}$$

Площадь поверхности испарения равна сумме площадей сторон нашего бурта 2,96 м<sup>2</sup>. Для получения более достоверных данных определяли количество воды, испарившееся с поверхности бурта при разных температурах компостируемой массы. Она изменяется от 20°C

до 75<sup>0</sup>С, причем период роста температур длится 2 недели, фаза высоких температур – 1 неделю и падение – 1 неделю. Тогда усредненное количество испарившейся жидкости летом составит  $g_B = 0,15$  кг/час (108 кг/мес). Примем, что в зимнее время максимальная температура компостируемой массы составляет 25<sup>0</sup>С. При этом температура поверхности испарения будет составлять 7<sup>0</sup>С.  $g_B = 0,022$  кг/час. Учитывая, что влажность воздуха зимой равна 88%, а влажность компоста 60%, то можно сделать допущение, что в зимний период влага, распределенная в объеме нашей массы, испаряться не будет, а вода, образующаяся в процессе биосинтеза, будет отводиться в жидком виде через дренажную систему. Результаты расчетов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Материальный баланс (на 1 метр бурта). Летний период**

Начало процесса		Конец процесса	
Компонент	Масса (кг/мес)	Компонент	Масса (кг/мес)
Осадки сточных вод после фильтр-пресса	81,25	Компост	159,585
Подрешеточная фракция ТБО	108,75		
Древесно-растительные отходы	54,375	Древесно-растительные отходы	16,315
Активный ил после вторичных отстойников	26,875	Вода за счет естественного испарения	108
Осадки после первичных отстойников	26,875	Вода, образующаяся в процессе биоразложения*	35,775
		Углекислый газ, образующийся в процессе биоразложения*	83,475
<b>ИТОГО</b>	<b>298,125</b>	<b>ИТОГО</b>	<b>403,15</b>

Вода и углекислый газ в сумме составляют 40% от компостируемой массы. Принимаем, что их соотношение равно 0,3:0,7 соответственно. Определим их количество:

$$m_B = 298,125 \times 0,4 \times 0,3 = 35,775 \text{ кг/мес}, m_{CO_2} = 298,125 \times 0,4 \times 0,7 = 83,475 \text{ кг/мес}.$$

Разность между массой в начале и конце процесса объясняется интенсивным испарением воды и образованием углекислого газа во время протекания процесса, поэтому для поддержания требуемой влажности компостируемой массы необходимо ее орошать. Количество воды, необходимой для дополнительного орошения, будет составлять  $G_B = 108 - 35,775 = 72,225$  кг/мес.

## Материальный баланс (на 1 метр бурта). Зимний период

ПРИХОД		РАСХОД	
Компонент	Масса (кг/квартал)	Компонент	Масса (кг/квартал)
Осадки сточных вод после фильтр-пресса	81,25	Компост	159,585
Подрешеточная фракция ТБО	108,75		
Древесно-растительные отходы	54,375	Древесно-растительные отходы	16,315
Активный ил после вторичных отстойников	26,875	Вода за счет естественного испарения	-
Осадки после первичных отстойников	26,875	Вода, образующаяся в процессе биоразложения	35,775
		Углекислый газ*	83,475
<b>ИТОГО</b>	<b>298,125</b>	<b>ИТОГО</b>	<b>295,15</b>

**Тепловой баланс процесса компостирования (в расчёте на 1 погонный метр бурта).**

Принимаем, что в теплое время года процесс компостирования длится 1 мес., в холодное – 3 мес. Тепловой баланс компостного бурта складывается в основном из следующих составляющих  $Q_{км} + Q_{микр} = Q_{щепы} + Q_{исп} + Q_{комп} + Q_{луч}$ .

**Вносимое тепло:**  $Q_{км}$  – с компостируемой массой. Складывается из тепла, вносимого каждым компонентом компостирования: осадком сточных вод (после фильтр-пресса), подрешеточной фракцией ТБО, древесно-растительными отходами, активным илом после вторичных отстойников, осадками первичных отстойников. Расчет вели по общей формуле  $Q = c \times m \times t^{\circ}$  Дж. Теплоёмкость осадка сточных вод (после фильтр-пресса), учитывая, что его влажность составляет 73–82%, определяли как теплоёмкость двухкомпонентного водного раствора по формуле [5]  $c_1 = 4200(1 - x) + c' \times x = 4200(1 - 0,2) + 1000 \times 0,2 = 3560$  Дж. (за теплоёмкость твёрдой фазы принята средняя теплоёмкость земли, торфа, глины, целлюлозы). Подрешеточная фракция ТБО представлена, в основном, пищевыми отходами (6) влажностью 85–95% и, соответственно, удельная теплоёмкость близка к теплоёмкости воды. Удельная теплоёмкость древесины 2720 Дж/(кг×К) [5]. Влажность сырого осадка и уплотнённого активного ила в среднем равна 95–98% [4], принимаем их теплоёмкость, равной теплоёмкости воды. Суммарное тепло, вносимое с компостируемой массой, составит  $Q_{к.м.} = 5,21 + 8,221 + 2,66 + 2,032 + 2,032 = 20,155$  МДж.

$Q_{микр}$  – выделяющееся в процессе компостирования (микробиологическое тепло). При компостировании 1 кг смеси (органики) выделяется 21 МДж [2,6], соответственно для нашей массы (297,5 кг – масса одного погонного метра бурта) оно будет равно 6247,5 МДж.

Теплом, вносимым с воздухом, подаваемым на аэрацию компоста в первом приближении можно пренебречь т.к. в зависимости от погодных условий оно может быть, как и положительным, так и отрицательным.

**Расходуемое тепло:**  $Q_{щ}$  – с непереработанной щепой;  $Q_{исп}$  – на испарение 108 кг воды потребуется 432 МДж тепла; ;  $Q_{комп}$  – оставшееся тепло готового компоста;  $Q_{луч}$  – лучеис-

пускаяем от более нагретого тела (компостный ряд) к менее нагретому (окужающая среда). Тепло, теряемое излучением, определяли по уравнению

$$(5): Q_{\text{луч}} = C \times \varphi \times F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ где: } C - \text{коэффициент излучения, Вт/(м}^2 \times \text{К}^4); F - \text{площадь поверхности излучения, м}^2; \varphi - \text{угловой коэффициент, безразмерный } (\varphi = 1) (5); T_1 \text{ и } T_2 - \text{температура поверхности более нагретого и менее нагретого тела, К; } C = \varepsilon \times C_{\text{ч}} - \text{коэффициент лучеиспускания, } C_{\text{ч}} = 5,7 \text{ Вт/(м}^2 \times \text{К}^4) - \text{коэффициент излучения абсолютно черного тела [5]; } \varepsilon - \text{степени черноты поверхности тела } (\varepsilon = 0,92) [5].$$

Так как температура поверхности испарения компостируемой массы в летний период меняется в течение процесса от 18<sup>0</sup>С до 63<sup>0</sup>С, то для получения более достоверных данных, определяли теплоту для нескольких температур поверхности и усредняли полученные результаты. Для зимнего периода в расчетах принимали, что температура поверхности испарения влаги составляет 7<sup>0</sup>С, а температура воздуха -10,8<sup>0</sup>С. Результаты расчетов приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

**Тепловой баланс (лето)**

Начало процесса	Тепло (МДж)	Конец процесса	Тепло (МДж)
Компостируемая масса	20,155	Компост	12,1
Процесс компостирования	6247,5	Щепа	0,8
Воздух	-	Испарение воды	432
		Остывание массы (излучение)	1043,8
<b>ИТОГО</b>	<b>6267,6</b>	<b>ИТОГО</b>	<b>1488,7</b>

Из табл. 3 видно, что наибольшее количество тепла уходит на излучение и на испарение воды (на испарение одного килограмма жидкости расходуется 4 МДж энергии). Так же ясно, что тепло, образующееся во время процесса, будет компенсировать данные теплопотери, а также потери, связанные с остыванием массы, соответственно дополнительно подводить тепло в процесс не нужно.

Таблица 4

**Тепловой баланс (зима)**

Начало процесса	Тепло (МДж)	Конец процесса	Тепло (МДж)
Компостируемая масса	21,09	Компост	12,65
Процесс компостирования	6247,5	Щепа	0,8
Воздух		Испарение воды	-
		Остывание массы	1718,5
<b>ИТОГО</b>	<b>6268,59</b>	<b>ИТОГО</b>	<b>1732</b>

Из табл. 4 видно, что в зимний период наибольшее количество тепла уходит при остывании компостируемой массы. Также ясно, что тепло, образующееся во время процесса, будет компенсировать данные теплотери, соответственно, во время процесса необходимо только поддерживать положительную температуру массы при аэрации теплым воздухом.

#### Выводы.

1. Определены оптимальные соотношения вводимых ингредиентов с целью получения компоста заданного состава из расчета на сухое вещество – 20–40% сброженной в метантенках смеси осадков сточных вод и избыточного активного ила, 5–20% выбранных из группы: сырой осадок сточных вод, избыточный активный ил, смесь сырого осадка сточных вод и избыточного ила, до 15% древесной щепы размером 10–30 мм и порядка 25–45% подрешеточной фракции твердых бытовых отходов.

2. Разработаны оригинальные технические решения по созданию нестандартного оборудования: системы дренажа, аэрации и контроля технологического процесса.

3. Проведен массообменный и тепловой расчет установки полигонного (в буртах) компостирования. Показано, что в летний период в расчёте на один погонный метр в месяц образуется 35 л воды и 83 кг углекислого газа и может испаряться до 108 л воды. Следовательно, в жаркий период требуется дополнительное орошение компостируемой массы порядка 70 л. Дополнительное орошение необходимо как для теплосъёма микробиологического тепла за счёт испарения, так и для увлажнения компостируемой массы.

4. Показано, что в зимний период образующаяся влага испаряется в малых количествах, а основная часть выводится через дренажную систему.

5. При компостировании тепловой баланс в основном складывается из тепла, вносимого компостируемыми ингредиентами и микробиологическим теплом. Причём тепло, образующееся в результате биосинтеза (6248 мДж на погонный метр), является подавляющим в тепловом балансе.

6. Тепла, образующегося при биосинтезе, достаточно для поддержания оптимальной температуры в любое время года. Причём летом требуется дополнительное орошение.

7. Проведён гидравлический расчёт установки. Показано, что гидравлическое сопротивление системы аэрации составляет 1100–1400 Па, а требуемый расход воздуха в режиме периодической продувки 745 м<sup>3</sup>/час. Подобран вентилятор – Ц4-70 №3.

АППАРАТНАЯ СХЕМА ПРОИЗВОДСТВА КОМПОСТОВ И ИСКУССТВЕННЫХ ПОЧВ.

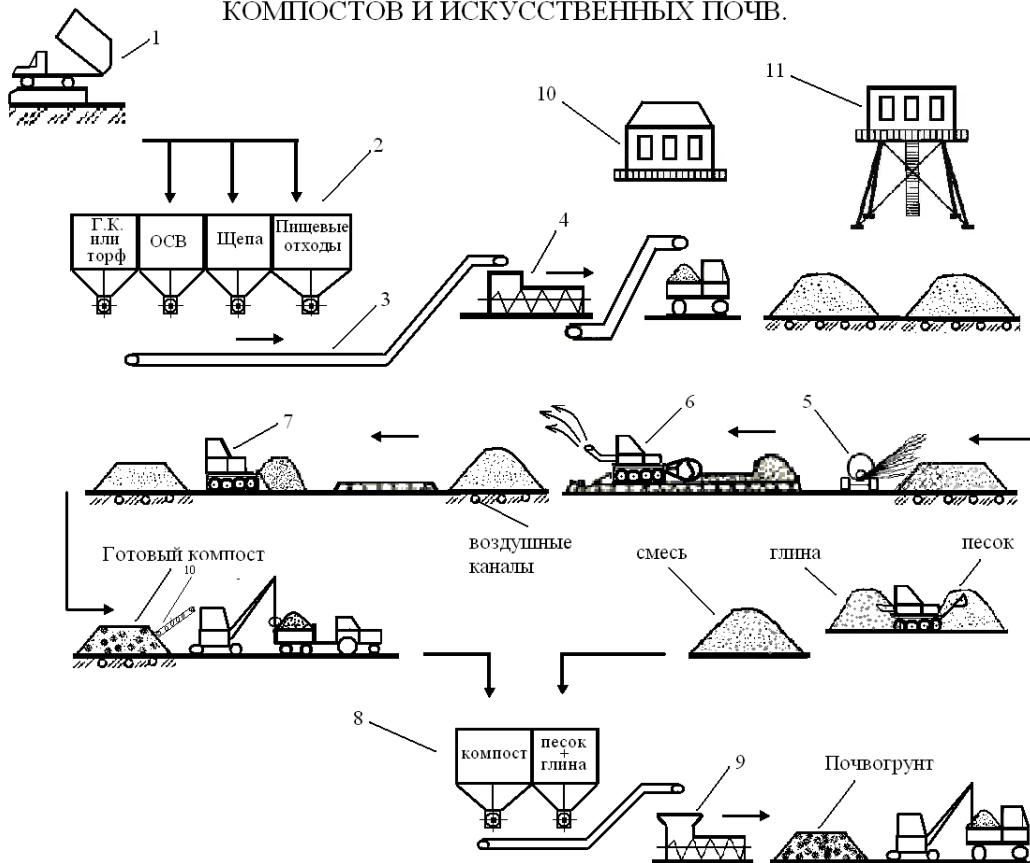


Рис. 1.

Литература

1. Луканин А.В. Способ совместного компостирования городских отходов городского хозяйства. Патент РФ №2414444 от 20.03.2011г. и др.
2. Экологическая биотехнология [Текст]: Пер. с англ./под ред. К.Д. Форстера, Д.А. Дж. Вейза.- Л.: Химия, 1990, -Пер. изд.: Великобритания, 1987г. 384с. ил.
3. Chang Yung [Text] / Trans. Br. Mycol. Soc/ 1967., V.50, №4, P.667.
4. Туровский И.С. Осадки сточных вод. Обезвоживание и обеззараживание. М.: ДеЛи принт, 2008. – 376 с.
5. Павлов К.Ф., Романков П.Г. Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии [Текст] / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – М.: Л., -Химия, 1981. – 560 с., ил.
6. Систер В.Г., Мирный А.Н. Современные технологии обезвреживания и утилизации твёрдых бытовых отходов [Текст] / В.Г. Систер, А.Н. Мирный. – М.: Изд. Академия коммунального хозяйства, 2003 г. – 303 с.
7. Ладыжинский Р.М. Кондиционирование воздуха [Текст] /Р.М. Ладыжинский. 3-е изд. – М.: Госторгиздат, 1962 г. – 352 с.
8. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика [Текст] / М.П. Вукалович. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 304 с. с чертеж.
9. Луканин А.В. Инженерная экология: процессы и аппараты очистки сточных вод и переработки осадков [Текст]: учеб. пособие / А.В. Луканин – М.: ИНФРА-М, 2017. – 605 с. +Доп. материалы.