

УДК 630.832

ББК 39.97

МОДЕЛИ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ТОПЛИВОСНАБЖЕНИЯ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПЛАНТАЦИЙ

Губий Е.В.¹

(Иркутский государственный университет, Иркутск)

Зоркальцев В.И.²

(Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, Иркутск)

Введение

Уже с древних времен древесина была важнейшим источником энергии. Дрова использовались с давних времен и были долгое время основным видом топлива. Их использовали для отопления жилищ, приготовления еды, а позже и для изготовления оружия и предметов быта. В девятнадцатом столетии дрова отошли на второй план, уступив свое первенство углю, а с середины двадцатого столетия – нефти и природному газу. Интерес к древесине как источнику энергии снова впервые возник в 30 – 40-х годах прошлого века в Германии. Тогда и были созданы первые энергетические плантации. Однако широкое распространение использование биомассы произошло только в 1970-х годах в результате ценового шока, поразившего мировой рынок нефти. В связи с ситуацией, породившей энергетический кризис, люди задумались над поиском новых видов топлива, в том числе возобновляемых. С этого времени стал бурно изучаться вопрос использования биомассы и, в частности, древесины для нужд энергетики.

¹ Елена Валерьевна Губий, заместитель директора Ботанического сада Иркутского государственного университета (egubiy@gmail.com).

² Валерий Иванович Зоркальцев, доктор технических наук, профессор (zork@isem.sei.irk.ru).

Современная технологическая цепочка всего цикла заготовки биомассы от планирования площадки и посадок до эффективного сжигания предполагает минимальное использование ручного труда и максимально эффективное использование теплогенерирующего оборудования. Однако исключение любого звена из анализа и оптимизации в этой цепочке приводит к ухудшению экономических показателей. Безусловно, создание такой технологической цепочки требует существенных капитальных вложений. Однако происходящее постоянное повышение цен на традиционные энергоносители делает использование местных видов возобновляемого топлива зачастую более выгодным, особенно, в удаленных относительно изолированных регионах.

Нужно иметь в виду и огромные экологические преимущества биотоплива. В отличие от ископаемых видов топлива, биотопливо не сопряжено с вовлечением в атмосферу новых объемов углерода и его оксидов, других продуктов угля и углеводородов. Кроме того, деньги, вложенные на закупку местного топлива, остаются в местном бюджете, а не выводятся за пределы региона. Принято считать, что каждые 10 тыс. МВт.ч тепловой энергии, произведенной с использованием местных видов биотоплива, создают одно новое рабочее место на заготовке биотоплива вне котельной, что очень важно для депрессивных сельских регионов, где это биотопливо и должно в первую очередь использоваться.

1. Модель комплексного анализа проекта

Построим математическую модель для анализа эффективности энергетической плантации в относительно отдаленных поселках. Прежде всего, необходимо определить потребности в котельно - печном топливе для данного населенного пункта.

Одно из основных составляющих этой потребности – отопление жилищ. Обозначим Q за норматив потребления теплоэнергии на отопление жилых помещений в поселке численностью n , в данной климатической зоне. Он определяется как произведение годового удельного расхода теплоты на отопление 1 кв.м. площади и нормы жилищной обеспеченности (кв.м.общей площади на 1 человека):

$$(1) \quad Q = Q_g * n * 18.$$

Здесь: Q_g – годовой удельный расход теплоты на отопление 1 кв.м. площади в рассматриваемом природно-климатическом регионе; 18 – норматив жилищной обеспеченности (количество кв.м. жилой площади на 1 человека); n – численность населения в поселке.

Годовой расход теплоты на отопление 1 кв.м. общей площади жилых зданий определяется по формуле [3]

$$(2) \quad Q_g = g_h * \frac{t_{in} - t_{out}^m}{t_{in} - t_{out}} * 24 * d.$$

Здесь: g_h – максимальный часовой расход теплоты на отопление 1 кв.м. общей площади жилых зданий, зависит от этажности (т.у.т./час); t_{in} – расчетная температура внутреннего воздуха отапливаемых зданий ($^{\circ}\text{C}$); t_{out} – расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления ($^{\circ}\text{C}$); t_{out}^m – средняя температура наружного воздуха за отопительный сезон ($^{\circ}\text{C}$); 24 – продолжительность работы систем отопления в сутки (час); d – средняя продолжительность отопительного сезона (сутки).

Для упрощения можем считать, что площадь плантаций представляет собой круг с радиусом r и с центром в населенном пункте. Круг разделен на t равных сегментов. Количество сегментов равно сроку созревания древесины (количеству лет). Каждый год на одном из сегментов осенью осуществляются лесозаготовки, а весной – посадки.

Обозначим $S(r, t)$ – площадь сегмента, с которого в данном году осуществляются лесозаготовки (выраженная в квадратных километрах). Эта площадь определяется по формуле:

$$(3) \quad S(r, t) = \frac{\pi r^2}{t} .$$

Пусть $f_i(t)$ – функция прироста древесины на единицу площади (количество т.у.т., накопленного в биомассе древесины на одном квадратном километре по прошествии t лет после посадки), где i – вид древесины, $i = 1, \dots, k$, k – количество рассматриваемых видов древесины.

Обозначим $R(i, r, t)$ объем годового производства топлива, зависящий от радиуса r , количества сегментов плантации t , а также от вида древесины i :

$$(4) \quad R(i, r, t) = S(r, t)f_i(t) .$$

Обозначим $C(i, r, t)$ приведенные затраты на производство древесного топлива в зависимости от вида древесины i , радиуса r и количества секторов t . Эти затраты включают в себя инвестиции на создание всей производственной инфраструктуры, затраты на непосредственное выращивание растений, затраты на заготовку и обработку древесины.

На основе перечисленных показателей предлагается, в частности, исследовать *задачу определения оптимального срока произрастания t культуры i и радиуса лесной площади r для обеспечения заданного потребления в топливе с минимальными издержками:*

$$(5) \quad C(i, r, t) \rightarrow \min ,$$

при условии, что объем годового производства топлива больше или равен потребности:

$$(6) \quad R(i, r, t) \geq Q .$$

При оценке потребности в котельно-печном топливе необходимо также учитывать его расходы на

пищеприготовление и санитарно-гигиенические нужды, на производственно-эксплуатационные нужды (в зависимости от располагаемых в этом поселке предприятий) и на социально-культурные нужды поселка. Суммарно эти дополнительные потребности могут составлять до 50% и более от годового расхода котельно-печного топлива в населенном пункте. Важно, что все эти виды потребностей существенно зависят от климатических характеристик региона, в котором размещен поселок.

Следует отметить, что возраст заготавливаемой древесины не должен превышать такой момент времени t , при котором впервые не выполняется условие среднегодового увеличения биомассы:

$$(7) \quad \frac{1}{t} f(t) \leq \frac{1}{t+1} f(t+1).$$

Отсюда следует, что необходимо ограничиться рассмотрением возраста древесины, не превышающей момент времени t , при котором впервые выполняется неравенство:

$$(8) \quad (f(t) - f(t-1)) \leq \frac{1}{t} f(t).$$

Вторая задача: *выбор оптимального объема использования древесного топлива в зависимости от цены альтернативного топлива и численности населения:*

$$(9) \quad C(i, r, t) + pL \rightarrow \min,$$

при условии

$$(10) \quad R(i, r, t) + L = Q.$$

Здесь L – объем использования альтернативного топлива (угля), p – цена альтернативного топлива (включая расходы на транспортировку) [1].

2. Математическая модель анализа надежности топливоснабжения

Одной из проблем такого топливоснабжения, требующей специальных исследований, является его надежность. Потребности в топливе и в производстве биомассы зависят от случайных факторов. При анализе экономической эффективности необходимо учитывать затраты на мероприятия по обеспечению надежности топливоснабжения и возможные ущербы при возникновении дефицитных ситуаций. Данный раздел посвящен проблеме надежности и оптимизации резервов и запасов топливоснабжения на основе энергетических плантаций.

В приводимой далее модели рассматриваются две случайные величины, из-за которых возникает проблема надежности топливоснабжения. Одной из них является потребность в топливе, другой – производство топлива.

2.1. Колебания потребности в топливе

Ограничимся исследованиями случайных отклонений потребности в топливе только на отопительные нужды. Они определяются случайными отклонениями продолжительности отопительного периода и случайными отклонениями среднезимних температур. Можем в первом приближении считать, что и другие составляющие потребности в котельно-печном топливе подвержены таким же случайным возмущениям (из-за действия метеорологических и других случайных возмущений).

Обобщенно оба указанные составляющие случайных отклонений потребности в топливе на отопление характеризуются колебаниями интегральной разности температур за отопительный период внутри и вне здания. Вероятность отклонения этого показателя от его среднего уровня оцениваются на основе данных многолетних метеорологических наблюдений.

В приводимых далее расчетах расход топлива на отопление в день $j = 1, \dots, N_\tau$ отопительного сезона τ считается

пропорциональным разнице между нормативной температурой воздуха в отапливаемых помещениях \hat{t} и среднесуточной температурой атмосферного воздуха в этот день $t_{\tau j}$. Здесь N_{τ} – продолжительность в днях отопительного периода τ . Даты его начала и окончания соответствуют дням, когда температура воздуха становится устойчиво в течении 5 дней ниже и, соответственно, устойчиво выше нормативного значения, принятого равным 8 градусам Цельсия [2].

Обобщенной характеристикой потребности в топливе на отопление за отопительный период τ служит показатель интегральной разности температур, измеряемый в градусоднях,

$$(11) \quad Q_{\tau} = \sum_{t=1}^{N_{\tau j}} (\hat{t} - t_{\tau j}), \tau = 1, \dots, G.$$

Здесь G – число ретроспективно рассматриваемых отопительных периодов.

Исходя из показателей Q_{τ}, N_{τ} , можно рассчитать среднесуточную за данный отопительный период разность температур внутри и вне зданий по формуле

$$(12) \quad O_{\tau} = \frac{Q_{\tau}}{N_{\tau}}, \tau = 1, \dots, G.$$

Важными природно-климатическими характеристиками экономических районов являются средние многолетние показатели:

- интегральной разности температур за отопительный период

$$(13) \quad \bar{Q} = \frac{1}{G} \sum_{\tau=1}^G Q_{\tau},$$

- продолжительности отопительного периода

$$(14) \quad \bar{N} = \frac{1}{G} \sum_{\tau=1}^G N_{\tau},$$

- среднесуточной разности температур внутри и вне зданий за отопительный период

$$(15) \quad \bar{O} = \frac{\bar{Q}}{\bar{N}}.$$

Результаты расчета показателей $\bar{Q}, \bar{N}, \bar{D}$ по городам Сибири представлены в табл. 1. Региональные центры в этой таблице упорядочены по мере убывания средней интегральной разности температур. Для сравнения можно отметить, что в центральных и южных районах России интегральная разность температур примерно в три раза ниже, чем в указанных сибирских регионах, как за счет сокращения продолжительности отопительных периодов, так и за счет повышения средних зимних температур (примерно в одной и той же мере). Это означает, что для отопления одних и тех же по конструкции зданий в центральных и южных районах требуется в год примерно в три раза меньше теплоэнергии и топлива, чем для отопления в сибирских регионах.

Таблица 1. Климатические характеристики отопительного периода по ряду сибирских и дальневосточных регионов России

Город	Средняя интегральная разность температур, градусодни	Продолжительность отопительного периода, дни	Среднесуточная за отопительный период разность температур внутри и вне зданий, °С
Чита	6954,21	236,69	29,40
Иркутск	6147,18	235,69	26,10
Томск	6051,20	232,45	26,07
Красноярск	5759,78	233,36	24,72
Хабаровск	5558,83	206,63	26,92
Екатеринбург	5342,35	225,81	23,69
Барнаул	5315,73	213,11	24,98
Владивосток	4381,55	196,24	22,35

Для изучения колебаний расхода топлива на отопление используем показатель отклонения потребности в топливе на отопление в условиях отопительного периода τ от среднеожидаемого уровня.

$$(16) \quad q_{\tau} = \frac{Q_{\tau}}{\bar{Q}}, \quad \tau = 1, \dots, G.$$

Важными характеристиками возможных отклонений потребности в топливе на отопление являются показатели:

- относительного возрастания в самые холодные из имевших место зим расхода топлива на отопление

$$(17) \quad \Delta_{\max} = \max_{\tau=1, \dots, G} (q_{\tau} - 1);$$

- снижение относительного среднеожидаемого уровня потребности в самые теплые из имевших место зим

$$(18) \quad \Delta_{\min} = \min_{\tau=1, \dots, G} (q_{\tau} - 1),$$

- диапазона (размах) вариации отклонений потребности

$$(19) \quad \Delta = \Delta_{\max} - \Delta_{\min}.$$

В качестве общей меры колеблемости потребности может служить показатель среднего абсолютного отклонения потребности от среднего уровня – интенсивность колебаний.

$$(24) \quad I = \frac{1}{G} \sum_{\tau=1}^G |q_{\tau} - 1|.$$

В табл. 2 представлены максимально возможные отклонения в сторону уменьшения и в сторону увеличения потребности в топливе на отопление от среднего уровня потребности, диапазон и интенсивность колебаний потребности в топливе на отопление. Региональные центры в табл. 2, как и в табл. 1, упорядочены по мере убывания средней интегральной разности температур.

Из табл. 2 четко видна закономерность – интенсивность и диапазон колебаний изменяются по регионам довольно синхронно, причем эти показатели в относительно теплых регионах выше, чем в относительно холодных. Исключением здесь является Хабаровск, который хоть и находится под влиянием резко-континентального климата, тем не менее, подвержен влиянию муссонов со стороны Тихого океана.

Таблица 2. Показатели, характеризующие колебания потребности в топливе на отопление по региональным центрам России

Город	Максимальные отклонения от среднегодового уровня в сторону		Диапазон колебаний потребности, %	Интенсивность колебаний, %
	уменьшения	увеличения		
Чита	-0,308	0,152	46,1	4,8
Иркутск	-0,453	0,162	61,5	6,1
Томск	-0,404	0,185	59,0	6,8
Красноярск	-0,276	0,265	54,1	6,3
Хабаровск	-0,248	0,102	35,0	4,9
Екатеринбург	-0,353	0,185	53,9	7,4
Барнаул	-0,321	0,321	64,3	6,3
Владивосток	-0,341	0,179	52,0	5,5

2.2. Математическая модель анализа и оптимизации средств обеспечения надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

Обозначим случайные величины интегральной разности температур \tilde{Q} . Вероятность реализации этой случайной величины обозначим $\tilde{P}(\tilde{Q})$. Эта функция принимает положительные значения на некотором интервале $[Q_1, Q_2]$. Причем

$$(20) \quad \int_{Q_1}^{Q_2} \tilde{P}(\tilde{Q}) d\tilde{Q} = 1,$$

$$(21) \quad \int_{Q_1}^{Q_2} \tilde{P}(\tilde{Q}) * \tilde{Q} d\tilde{Q} = \bar{Q}.$$

Будем считать величину средней многолетней потребности в топливе на отопление для рассматриваемого населенного пункта заданной. Обозначим ее \bar{Q} . Случайные значения этой величины будем обозначать Q .

Считаем, что указанная случайная величина находится в интервале $[kQ_1, kQ_2]$, где $k = \bar{Q}/\bar{Q}$. Тогда вероятность ее реализации задается функцией

$$(22) \quad P(Q) = \tilde{P}(\tilde{Q}),$$

при $Q = k\tilde{Q}$.

Случайность при производстве топлива возникает из-за возможных колебаний урожайности. Считаем фиксированной среднюю ожидаемую величину поставок топлива к отопительному периоду, которую обозначим \bar{R} . Саму случайную величину поставок топлива обозначим \tilde{R} . Считаем, что эта величина находится в интервале $[R_1, R_2]$. Вероятность реализации данной случайной величины обозначим в виде функции $\rho(\tilde{R})$, которая принимает положительные значения на рассматриваемом интервале и удовлетворяет условиям

$$(23) \quad \int_{R_1}^{R_2} \rho(\tilde{R}) d\tilde{R} = 1,$$

$$(24) \quad \int_{R_1}^{R_2} \rho(\tilde{R}) \tilde{R} d\tilde{R} = \bar{R}.$$

Величины Q и R рассматриваются в модели как экзогенные случайные величины.

Модель анализа надежности топливоснабжения. Далее рассматривается модель, многократно имитирующая прохождение отопительного периода при различных реализациях указанных случайных величин. При этом в качестве экзогенных параметров модели функционирования в течение одного отопительного периода рассматриваются запасы топлива сохранившиеся с прошлого отопительного периода.

Величину этих запасов обозначим S . Хранение топлива сопровождается всегда некоторыми потерями. Обозначим за α величину потери в результате хранения единицы топлива в течение года.

Еще одной переменной в модели выступает величина дефицита топлива за отопительный период. Эту величину обозначим D . Заметим, что значение запасов S на конец данного

периода и дефицита D являются случайными величинами, определяемыми в результате расчета по модели.

В данной статье в качестве стартовой будем рассматривать ситуацию, когда математическое ожидание потребности совпадает с математическим ожиданием поставок топлива

$$(25) \quad \hat{Q} = \bar{R}.$$

В общем случае это равенство, в том числе из-за погрешностей расчета среднего значения потребности может не выполняться. Необходимо предусматривать специальные дополнительные средства повышения надежности топливоснабжения для компенсации ошибок в расчетах среднеожидаемой потребности.

Обозначим $f = 1, \dots, F$ номера статистических испытаний методом Монте–Карла по заданным функциям вероятности P и ρ случайных величин потребности в топливе Q_f и заготовок топлива R_f .

Считаем заданной величину запасов на начало первого периода статистических испытаний. Дефицит возникает, когда потребление превышает поставки и запасы прежних лет и определяется по формуле

$$(26) \quad D_f = (Q_f - R_f - S_f)_+.$$

Здесь функция $(x)_+$ является неотрицательной с резко:

$$(27) \quad (x)_+ = \max\{0; x\}.$$

При этом оцениваются возможные остатки топлива на конец отопительного периода

$$(28) \quad H_f = (R_f + S_f - Q_f)_+.$$

Эти остатки переходят в запасы топлива на начало следующего отопительного периода с учетом коэффициента потерь α :

$$(29) \quad S_f = \min\{(1 - \alpha)H_f; z\},$$

где z – емкость складов многолетнего регулирования запасов (сверх емкости для хранения сезонных запасов). В представленных здесь расчетах емкость складов многолетнего регулирования принята равной половине среднегодовой потребности в топливе на отопление.

Математическое ожидание дефицита вычисляем по формуле

$$(30) \quad MD = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F D_f.$$

Обозначим за TD множество номеров испытаний

$$(31) \quad TD = \sum_{f=1}^F \text{sign}(D_f),$$

при которых возникает дефицит. Здесь:

$$(32) \quad \begin{aligned} \text{sign}(x) &= 1, \text{ если } x > 1; \\ \text{sign}(x) &= 0, \text{ если } x = 0. \end{aligned}$$

Величина $PD = \frac{TD}{F}$ является оценкой вероятности появления дефицитных ситуаций.

Пусть r – резерв мощностей в долях от \bar{R} , тогда

$$(33) \quad \hat{R} = (1+r)\bar{R},$$

$$(34) \quad R \in [(1+r)R_1, (1+r)R_2]$$

Вероятность объемов производства топлива с учетом их возрастания из-за введения резервов мощностей определяется по правилу

$$(35) \quad \rho(R) = \rho(\hat{R}), \text{ при } R = (1+r)\hat{R}.$$

Общие затраты будут состоять из приведенных затрат на резервирование и математического ожидания ущербов от дефицита:

$$(36) \quad F(r) = \Delta C(r) + MY(r).$$

1. Затраты на резервирование

$$(38) \quad \Delta C(r) = C(\bar{R}(1+r)) - C(\bar{R}),$$

где C – приведенные затраты на топливоснабжение в зависимости от математического ожидания поставок топлива.

2. Математическое ожидание ущербов от дефицитов

$$(37) \quad MY(r) = MDy,$$

где y – удельные ущербы.

2.3. Оценка оптимального состава средств резервирования

При среднеожидаемом значении урожайности в 680 т.у.т. с 1 кв.км.[5], среднеожидаемая величина поставок топлива к отопительному периоду \bar{R} и среднеожидаемая потребность в топливе на отопление \hat{Q} составляют 3354 т.у.т. на поселок (при численности населения 3 тысячи человек).

Таблица 3. Затраты на резервирование и математическое ожидание ущерба от дефицита в зависимости от резерва мощностей

Резерв мощностей	0,00	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
Затраты на резервирование	0,00	0,11	0,17	0,23	0,29	0,34
М.о. ущерба от дефицита	0,64	0,30	0,15	0,03	0,00	0,00
Суммарные затраты	0,64	0,41	0,32	0,26	0,29	0,34
Вероятность дефицита с учетом запасов	0,36	0,24	0,17	0,06	0,00	0,00
М.о. запасов	490,1	672,7	784	915	1122	1343

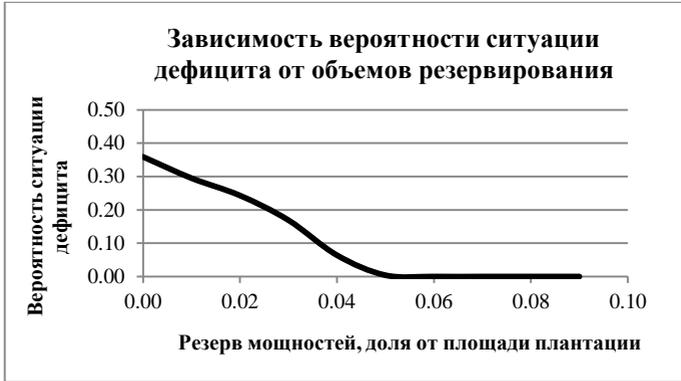


Рис.1. Зависимость вероятности дефицита от объемов резервирования

Вероятность возникновения ситуации дефицита составляет 36%, математическое ожидание ситуации дефицита – 64 т.у.т.

Из Таблицы 3 и Рис. 1 видим, что при увеличении резервов мощностей, вероятность дефицита монотонно уменьшается.



Рис.2. Зависимость затрат на резервирование и математического ожидания ущерба при дефиците от резерва мощностей



Рис.3. Зависимость суммарных затрат от объемов резервирования

На Рис. 2 видно, что с увеличением резерва мощностей математическое ожидание ущербов от дефицита уменьшается, в то время как затраты на резервирование увеличиваются. При росте резерва мощностей сначала происходит сокращение суммарных затрат за счет снижения математического ожидания ущербов от дефицита. Затем суммарные затраты начинают возрастать вследствие привалирования в них роста затрат на резервирование. (см.Рис. 3).

Как видно из Рис.3, в точке минимума суммы двух функций (затрат на резервирование и ущерба от ситуации дефицита) резерв мощностей составляет 4%, в этом случае вероятность ситуации дефицита составляет 0,06.

Литература

1. ГУБИЙ Е.В., ЗОРКАЛЬЦЕВ В.И. *Создание математической модели для анализа эффективности*

энергетических лесов / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск, 2012. - № 2(34). – С. 80-82.

2. ЗОРКАЛЬЦЕВ В.И. *Анализ колебаний потребности в топливе на отопление по экономическим районам СССР на основе многолетних наблюдений температур.* // Методы оптимизации и их приложения: труды XII Байкальской Международной конференции. – Иркутск, 2001.– С.143–157.
3. *Методические указания по определению расходов топлива, электроэнергии и воды на выработку теплоты строительными котельными коммунальных теплоэнергетических предприятий.* - М.: ОНТИ АКХ им. К.Д. Памфилова, 1987. - 95 с.
4. ЦИВЕНКОВА Н.М., САМЫЛИН А.А. *Быстрорастущие плантации тополя – новая энергетическая сырьевая база* // ЛесПромИнформ, 2005. – №8. – С. 58–63.