

УДК 621.3

## Исследование и прогнозирование качества функционирования электротехнических комплексов зданий для занятий водными видами спорта при внешних воздействиях

С. В. Гужов

### Сведения об авторе

**Гужов Сергей Вадимович** — кандидат технических наук, доцент кафедры Тепломассообменных процессов и установок МЭИ, e-mail: GuzhovSV@yandex.ru

Под показателями качества функционирования энергосистем зданий понимается эффективное использование различных видов энергоресурсов, характеризующееся расходом минимального количества энергии для обеспечения необходимого уровня энергопотребления, соответствующего проектным показателям, технологическим регламентам или режимным картам.

Прогнозирование изменения, например, уровня теплотребления через использование удельных показателей тепловой нагрузки здания при частичной замене оборудования сложно и не всегда поддается расчету.

Попытки исследования качества функционирования энергосистем и прогнозирования объемов потребления энергоресурсов на основе общепринятых моделей приводит к введению коэффициентов, снижающих точность.

Для формирования функции прогнозирования качества функционирования энергосистем зданий, обладающей достаточной точностью для анализа изменений при разнообразных внешних воздействиях, в работе последовательно решены следующие задачи:

определение необходимого и достаточного числа наблюдений для обеспечения возможности прогноза теплотребления зданий для занятий водными видами спорта с точностью  $\delta \geq 95\%$  и доверительной вероятностью  $\gamma \geq 50\%$ ;

выявление факторов, влияющих на энерго- и теплотребление, и сортировка их согласно специфики системы электро- и теплоснабжения;

оценка точности и достоверности прогнозной модели для анализируемого здания для занятий водными видами спорта.

Согласно шестифакторному прогнозу расчетная погрешность составила 7,43%, что является достаточно малой величиной для подобных моделей.

Предложенный в работе аналитический подход к формированию функций энергопотребления зданий упрощает расчет, позволяет использовать данные, имеющиеся на каждом объекте, оценить точность и доверительную вероятность возможности снижения объемов потребления энергоресурсов и создает предпосылки к формированию обоснования эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий в инженерных системах действующих объектов.

Недостаток указанного способа состоит в сложности интерпретации получаемых коэффициентов при значащих факторах с точки зрения электро- и теплотехнических процессов, а преимущество заключается в использовании только доступных первичных исходных данных при достижении необходимой точности расчета.

Ключевые слова: прогнозирование энергопотребления, регрессионный анализ, доверительная вероятность.

---

## Studying and predicting the performance quality of power supply systems of water sports buildings subjected to various external effects

S. V. Guzhov

### Information about author

**Guzhov Sergey V.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Heat-and-Mass Transfer Processes and Installations Dept., MPEI, e-mail: GuzhovSV@yandex.ru

The performance quality indicators of the power supply systems of buildings characterize how efficiently various kinds of energy resources are used; in turn, their efficient use implies expenditure of the minimal amount of energy to cover the necessary level of energy consumption corresponding to the design parameters, technological regulations, or process charts.

Attempts to predict variations of, e.g., the level of heat consumption through the use of specific indicators of the building's heat load under the conditions of partial replacement of equipment encounter difficulties and sometimes are not amenable to calculation.

Attempts to study the performance quality of power supply systems and predict the consumption of energy resources using commonly adopted models entail the need to introduce factors that make the results less accurate.

In this study, the following tasks were solved in a consistent manner for constructing the function used to predict the performance quality of the power supply systems of buildings with accuracy sufficient for analyzing the changes occurring under various external effects:

determining the necessary and sufficient number of observations to enable making a forecast of heat consumption in buildings for water sports with accuracy  $\delta \geq 95\%$  and confidence probability  $\gamma \geq 50\%$ ;

identifying the factors affecting the consumption of power and heat, and categorizing them according to the specifics of the power and heat supply system; and

estimating the accuracy and validity of the forecasting model for the water sports building being analyzed.

According to the six-factor forecast, the calculated error was estimated at 7.43%, which is a quite low value for such models.

The proposed analytical approach to construction of energy consumption functions of buildings simplifies the calculation and makes it possible to use the data available at each facility. In addition, it allows one to estimate the accuracy and confidence level of the possibility to reduce the consumption of energy resources and creates prerequisites for substantiating the efficiency of introducing energy saving measures in the engineering systems of the existing facilities.

The drawback of the considered method lies in the complexity of interpreting the obtained coefficients at the significant factors from the viewpoint of electrical and thermal processes. On the other hand, its advantage lies in the possibility of using only the available primary initial data while reaching the required calculation accuracy.

Key words: forecasting of energy consumption, regression analysis, confidence probability.

Цель статьи — формирование функции прогнозирования качества функционирования энергосистем зданий для занятий водными видами спорта, обладающей достаточной точностью для анализа изменений при разнообразных внешних воздействиях.

Прогностические функции, как правило, опираются на исходные данные, полученные в ходе экспериментов. Отличительной особенностью поставленной цели является факт невозможности проводить повторяющиеся эксперименты на действующем объекте. Поэтому в дальнейшем будем использовать математический аппарат, учитывающий факт работы не с экспериментальными данными, а с данными, полученными в результате последовательных наблюдений.

Расчет базовой линии имеет основой периодические показания приборов учета исследуемого вида энергоресурса в базовый период:  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ . Данные наблюдений могут быть преобразованы в массив ежемесячных приростов потребленного энергоресурса  $X = (x_1, x_2, \dots, x_{k-1})$ , где  $x_i = p_i + 1 - p_i$  и  $k = n - 1$ . Теоретически значения  $X$  могут принимать любое значение больше нуля:  $x_i = [0; +\infty)$ . Поэтому полученный массив величин можно однозначно классифицировать как массив непрерывных случайных величин (НСВ).

Опираясь на первичные формулы для среднего квадратичного отклонения НСВ [1, с. 134] необходимо проанализировать массив данных на предмет выявления его свойств, присущих используемым видам распределения. Из существующих распределений вероятностей для решения задачи наиболее целесообразно использовать распределение Стьюдента, подчиненное закону плотности распределения [1, с. 146] и имеющее нарастание функции, ее максимум с последующим убыванием:

$$T = \frac{Z}{\sqrt{V/k}},$$

где  $Z$  — нормальная случайная величина, имеющая свойства: математическое ожидание НСВ  $M(Z) = 0$  и

среднее квадратичное отклонение НСВ  $\sigma(Z) = 1$ ;  $V$  — независимая от  $Z$  величина, распределенная по закону  $\chi^2$  с  $k$  степенями свободы. С возрастанием  $k$  распределение Стьюдента быстро приближается к нормальному.

Для абсолютного большинства случаев анализ типа распределения массивов исходного и уточняющих факторов показал соответствие их распределению Стьюдента. Опираясь на параметр  $T$ , для выявления типа распределения случайной величины удобно пользоваться правилом трех сигм. Если случайная величина распределена нормально, то абсолютная величина ее отклонения от математического ожидания не превосходит утроенного среднего квадратического отклонения [1, с. 135]. На практике правило используется в следующем виде: если распределение изучаемой непрерывной случайной величины неизвестно, но абсолютная величина отклонения превышает утроенное среднее квадратическое отклонений лишь в 0,27% случаев или меньше, то есть основание предполагать, что изучаемая величина распределена нормально; в противном случае она распределена не нормально.

Постановка задачи при обработке массива данных, полученных посредством последовательных наблюдений: определение необходимого и достаточного числа экспериментов. Если требуется оценить математическое ожидание с наперед заданной точностью  $\delta$  и доверительной вероятностью  $\gamma$ , то минимальный объем выборки, который обеспечит эту точность, вычисляемую по формуле [1, с. 216]:

$$n_{\text{изм}} = \frac{t^2 \sigma^2}{\delta^2}, \quad (1)$$

где  $t$  — аргумент, которому соответствует значение функции Лапласа, равно  $\gamma/2$  (таблица).

В случае с неизвестным значением  $\sigma$  генеральной совокупности используют оценку  $\hat{\sigma}$  для выборки:

### Значение минимального числа наблюдений для различных $\gamma$ и $\delta$

Доверительная вероятность $\gamma$	Точность прогнозной модели $\delta$		
	50	75	95
0,99 (t = 2,58)	4	364	364
0,95 (t = 1,96)	2	210	210
0,90 (t = 1,65)	1	149	149
0,80 (t = 1,29)	1	91	91
0,50 (t = 0,68)	0	25	25

$$s^2 = \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})^2}{k-1}. \quad (2)$$

С учетом (2) формула (1) может быть преобразована:

$$n = t^2 s^2 / \delta^2. \quad (3)$$

Нетрудно заметить, что (3) существенно зависит от значений выборки; в рассматриваемом случае – от значений ежемесячного потребляемого энергоресурса.

Анализ выборок генеральных совокупностей, полученных на основе электро- и теплопотребления зданий, позволяет рассчитать значения минимального необходимого числа наблюдений, которые требуются для достижения заданной точности  $\delta$  и доверительной вероятности  $\gamma$  (см. таблицу)

Прогнозные модели, создаваемые для оценки функционирования инженерных систем, особенно требовательны к точности расчета. Вместе с тем, редко можно встретить объект, имеющий достоверные данные о потреблении энергоресурсов более чем за 4 — 5 лет.

Согласно таблице для достижения точности 95% и доверительной вероятности 50% достаточно 25 последовательных наблюдений, что составляет 2 года и 1 месяц. При увеличении  $\gamma$  до 80%, число наблюдений возрастает до 91, что соответствует 7 годам 7 месяцам. В дальнейших расчетах примем минимальное число наблюдений равным 36, что составляет 3 года.

Рассмотрим далее факторы, влияющие на электро- и теплопотребление зданиями для занятий водными видами спорта. Специфичность подобного рода сооружений состоит в необходимости подогревать существенный объем воды, располагающийся в чаше бассейна, а также в создании соответствующего микроклимата во всех помещениях. Недостаточное внимание к вопросам обеспечения микроклимата помещений бассейнов приводит к негативным последствиям в процессе их эксплуатации: активной конденсации влаги на ограждающих конструкциях, чрезмерной увлажненности и подвижности воздуха в зоне нахождения людей. Следует отметить, что помещения закрытых плавательных бассейнов относятся к категории помещений с влажным режимом, имеющим свои отличительные особенности при формировании в них те-

пловых и влажностных потоков, определяющих выбор того или иного технического решения по обеспечению требуемых санитарно-гигиенических условий. Например, существенной спецификой и сложностью отличается расчет зависимости температуры и влажности воздушных масс в зале чаши бассейна в от высоты над уровнем зеркала воды.

Особенностями обладает расчет интенсивности теплового потока через ограждающие конструкции зала с чашей бассейна с учетом влажности содержащегося воздуха. Интенсивность инфильтрации является функцией температуры и влажности наружного и внутреннего воздуха, температуры на внутренней поверхности ограждающих конструкций и теплофизических характеристик соответствующего ограждения. Сложность расчета для конкретного бассейна состоит и в том, что некоторая часть данных принимается из нормативных документов [2], другая из статистических данных, характерных для расположения объекта расчета. Например, расчетная зимняя температура и теплосодержание наружного воздуха принимаются согласно требованиям [3] с учетом параметров тепловой инерции здания [4]. Расчетная температура внутреннего воздуха для помещений плавательных бассейнов принимается в соответствии [5]. При этом сопротивление теплопередаче, характеризующее степень тепловой защиты ограждающей конструкции, равно как и коэффициент, зависящий от ориентации ограждения относительно наружного воздуха, целесообразнее измерять для исследуемого здания.

Необходимо отметить, что процесс измерения и интегрирования даже такого показателя, как «сопротивление теплопередаче» для здания имеет дорогостоящий и трудоемкий характер. Как следствие, процесс прогнозирования энергопотребления бассейна, выполняемый на основании приведенных данных, сложен и не обладает достаточной точностью, что требует разработки новых подходов к формированию прогнозной функции энергопотребления зданий для занятий водными видами спорта.

Несмотря на то, что здание снабжается различными видами энергоресурсов: электрическая энергия, тепловая энергия, холодная вода городского водопровода, — математические подходы к формированию функции энергопотребления здания одинаковы. На энергопотребление зданий для занятия водными видами спорта могут оказывать влияние:

- среднемесячная температура наружного воздуха;
- число часов работы основных электропотребителей и их мощность;
- ежемесячное число посетителей;
- объемы потребления иных энергоресурсов;
- температура и влажность внутри здания;
- влажность наружного воздуха.

При составлении прогнозной функции энергопотребления здания, важно определить необходимое и

достаточное число значащих факторов. На изменение расхода тепловой энергии бассейна, помимо обычных нагрузок, могут оказывать влияние случайные факторы:

- плановые ежегодные спортивные мероприятия (соревнования);
- плановые ежегодные эксплуатационные мероприятия (например, генеральная уборка и т.п.);
- остановка системы теплоснабжения на внеплановый ремонт;
- теплопотери и утечки в передающих сетях [6];
- дрейф погрешности прибора учета от времени или из-за изменения показателей качества учитываемого ресурса и пр.

Следует помнить, что некоторые факторы могут влиять друг на друга, а, значит, необходимо проводить соответствующую проверку. Так, например, на фактор «температура внутри здания» оказывают влияние:

- 1)  $Q_{\text{ОТОПЛЕНИЕ. РАДИАТОРЫ}}$  — теплопритоки от системы отопления;
- 2)  $Q_{\text{ЛЮДИ}}$  — теплоприток от посетителей и работников здания (считается по нормам);
- 3)  $Q_{\text{ОБОРУДОВАНИЯ}}$  — теплоприток от электрических приборов инженерных систем и бытовых с учетом показателей качества электрической энергии, влияющих на КПД работы электроприборов: уровень напряжения;  $\cos\varphi$ ; уровень гармонических составляющих тока напряжения;
- 4)  $Q_{\text{ОСВЕЩЕНИЕ}}$  — теплоприток от осветительных приборов;
- 5)  $Q_{\text{ИНФИЛЬТРАЦИИ}}$  — потери тепловой энергии с притоком холодного наружного воздуха;
- 6)  $Q_{\text{ОГР.КОНСТРУКЦИЙ}}$  — потери тепловой энергии через ограждающие конструкции (пол, стены, потолок, стекла окон, чердак и пр.);
- 7)  $Q_{\text{ЗАЛ}}$  — теплоприток от влажного воздуха, поднимающегося от зеркала чаши бассейна и пр.

Использование факторов с взаимным влиянием в расчетах не рекомендуется, так как это усложняет расчет и снижает точность результатов. Значащие факторы группируются в массивы данных, пригодных для по-

следующей обработки. На рис. 1 представлена структурная схема алгоритма прогнозирования технологического эффекта от проведения энергосберегающих мероприятий в действующих инженерных системах и верификации технического эффекта в сопоставимых условиях.

Далее методами многофакторной регрессии проводят верификацию массивов всех факторов с учетом сопоставимых условий. Для прогнозирования технологического эффекта от проведения энергосберегающих мероприятий в действующих инженерных системах выполняют анализ зависимостей между исходными и прогнозными значениями выбранных факторов, которые представляют собой количественные характеристики объемов потребляемых энергоресурсов.

Результатом является математическая функция, описывающая зависимость прогнозного значения исходного фактора от каждого из уточняющих дополнительных факторов.

В качестве примера рассмотрим здание для занятий водными видами спорта — бассейн НИУ «МЭИ». Здание 1954 г. постройки, общая площадь 2000 кв.м., отапливаемая — 1500 кв.м. Составим прогноз потребления тепловой энергии с точностью не менее 95% и доверительной вероятностью не менее 50%. Поскольку в здании для занятий водными видами спорта тепловое потребление преобладает над потреблением электрической энергии, составим прогнозную функцию теплопотребления в зависимости от факторов. Исходные данные приведены на рис. 2, 3, данные по погодным факторам взяты с сайта МетеоТВ [7]. Для сравнения расчет выполнялся для случаев учета трех, четырех, пяти и шести факторов. Результативным показателем значения нормированного  $R$ -квадрата. Чем точнее расчет, тем ближе значение нормированного  $R$ -квадрата к единице [8, с. 252].

Функции теплопотребления, сформированные для различного числа значащих факторов, представлены ниже:

три фактора, нормированный  $R$ -квадрат = 0,886:

$$Y = 83,924 + 0,001X_1 - 6,120X_2 + 0,006X_3;$$

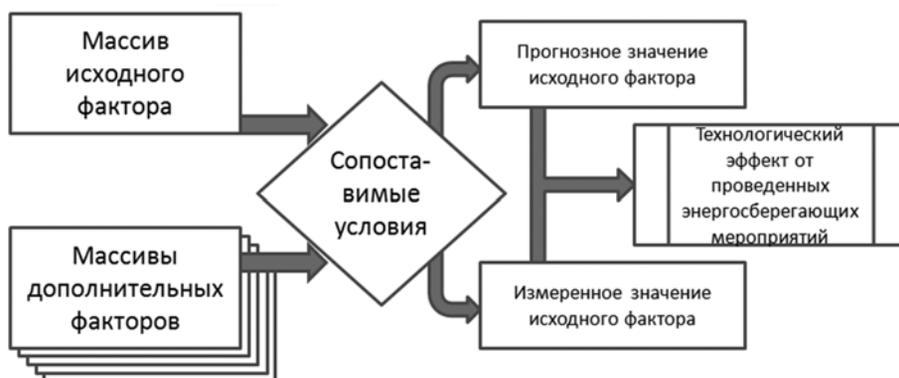


Рис. 1. Блок-схема формирования прогнозной функции энергопотребления

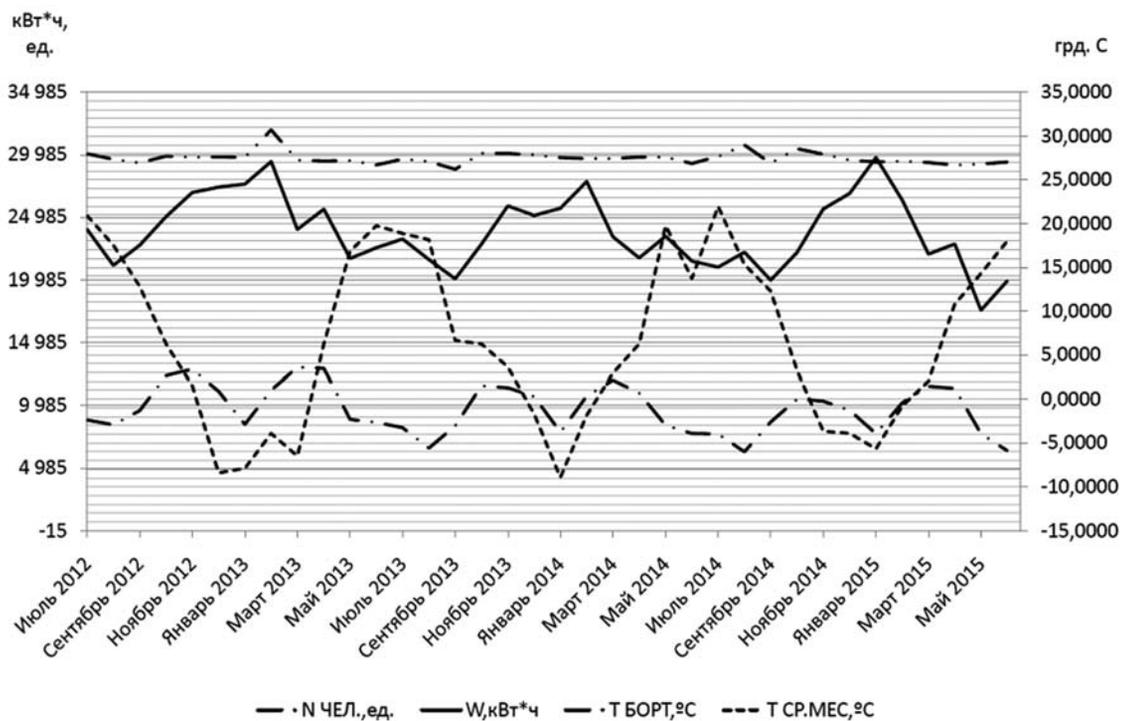


Рис. 2. Исходные факторы для формирования функции теплопотребления

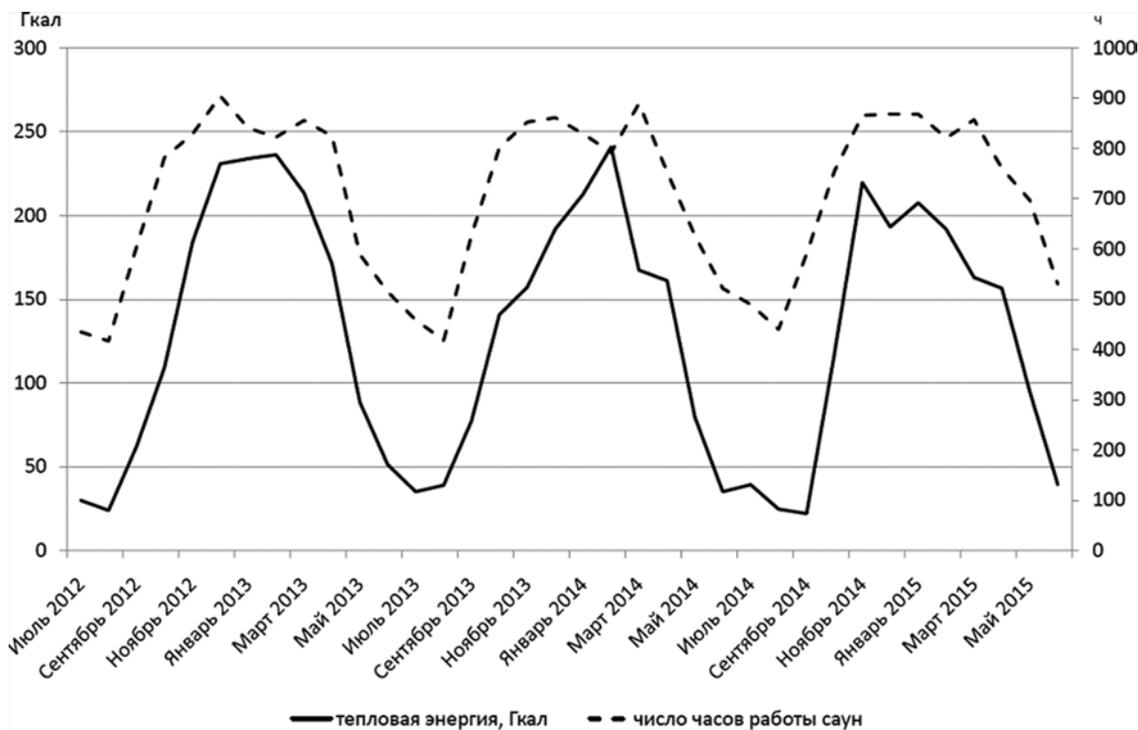


Рис. 3. Результирующие факторы для формирования функции теплопотребления

четыре фактора, нормированный  $R$ -квадрат = 0,8837:

$$Y = 96,335 + 0,001X_1 - 6,120X_2 + 0,006X_3 - 0,487X_4; \quad (4)$$

пять факторов, нормированный  $R$ -квадрат = 0,9035:

$$Y = -105,955 + 0,001X_1 - 3,58X_2 + 0,0007X_3 + 2,515X_4 + 0,19X_5; \quad (5)$$

шесть факторов, нормированный  $R$ -квадрат = 0,9257:

$$Y = -51,28 + 0,005X_1 - 4,15X_2 + 0,0003X_3 + 1,315X_4 + 0,15X_5 - 1,1X_6. \quad (6)$$

Графики отклонений прогнозных значений от фактических для четырех- (4), пяти- (5) и шестифакторного (6) прогнозов представлены на рис. 4.

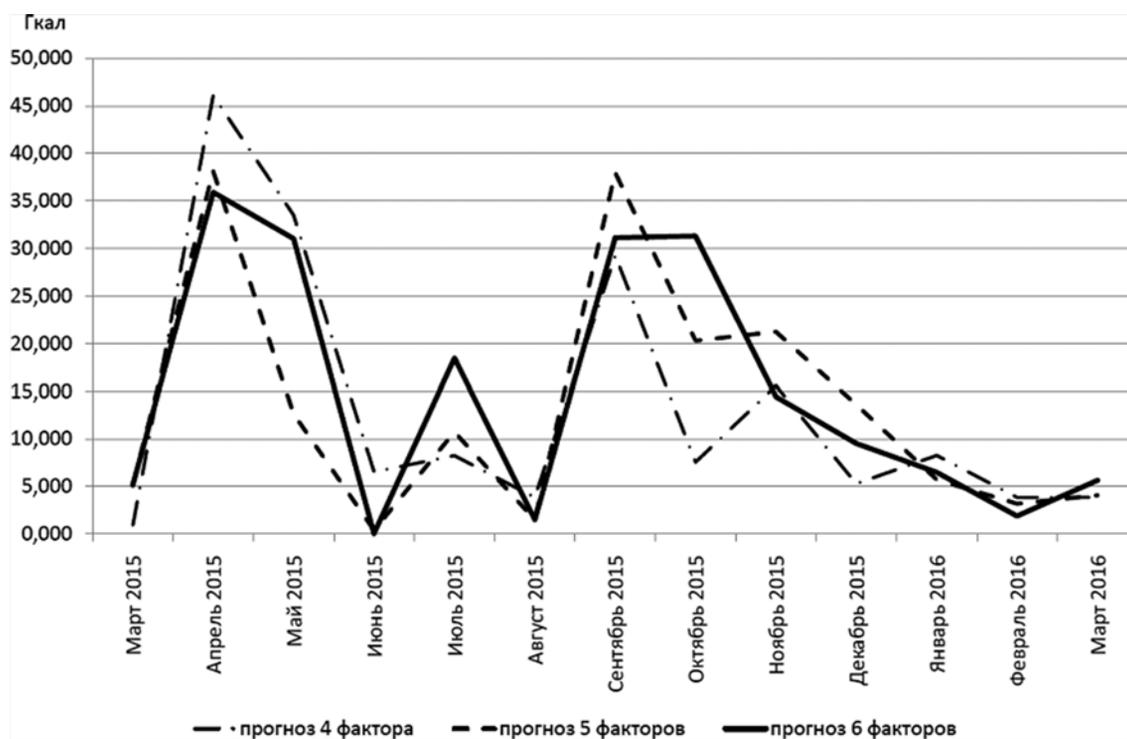


Рис. 4. Отклонения прогнозных факторов от фактических значений теплотребления исследуемого объекта

Расчет показал, что с увеличением числа значащих факторов, точность расчета неуклонно повышается. Для шестифакторного прогноза погрешность расчета составляет 7,43%, что является достаточно малой для подобных моделей величины.

Необходимо отметить, что для составления функции теплотребления бассейна требуется существенный объем исходных факторов, обладающих заданной точностью и достоверностью. Для периодического сбора, накопления и агрегирования значений каждого из факторов целесообразно использовать автоматизированный аппаратно-программный комплекс. Сбор факторов вручную трудоемок, обработка данных без компьютеров невозможна.

Прогнозирование качества функционирования энергосистем зданий для занятий водными видами спорта и анализ их изменений при разнообразных внешних воздействиях показали пригодность и достаточную точность расчета при использовании метода многофакторного регрессионного анализа. Недостаток рассматриваемого способа состоит в сложности интерпретации получаемых коэффициентов при значащих факторах с точки зрения электро- и теплотехнических процессов. Преимущество использования данного способа состоит в использовании только доступных

первичных исходных данных при достижении необходимой точности расчета. Результаты работы могут применяться для прогнозирования объемов электро- и теплотребления зданий для занятий водными видами спорта.

## Литература

1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Изд-во Юрайт, 2013.
2. СП 31-113—2004. Бассейны для плавания.
3. СНиП 23-01—99. Строительная климатология.
4. СНиП 23-02—2003. Тепловая защита зданий
5. СНиП 2.08.02— 89. «Общественные здания и сооружения», с дополнениями.
6. Lambert G. ISO 50001 pilot programme: US companies implement standard with government support // ISO Focus+. 2011. P. 11 — 14.
7. Метео-ТВ [Официальный сайт]. <http://www.meteo-tv.ru/weather/archive/> (дата обращения 26.09.2016).
8. Низаметдинов Ш.У., Румянцев В.П. Анализ данных. М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2012.

*Статья поступила в редакцию 02.06.2016*