

## **О формировании базы данных цифровой модели системы теплоснабжения здания**

### **Введение**

Проблемы структурной и параметрической оптимизации являются актуальными как для проектирования новых, так и при модернизации существующих систем теплоснабжения (СТ). В рамках структурной оптимизации осуществляется выбор рационального состава системы теплоснабжения и конфигурации тепловой сети, места размещения теплоисточников и их производительности.

В странах Северной Европы сегодня создаются СТ 4-го поколения. Проводимые там в последнее время исследования подтвердили технические возможности:

1. применения технологий низкотемпературного теплоснабжения;
2. расширения использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ);
3. снижения расхода теплоты на отопление зданий и потерь теплоты в тепловых сетях;
4. расширения возможности и доступности средств автоматизации;
5. увеличения роли предиктивной аналитики при прогнозировании потока отказов оборудования в будущих периодах.

Указанные направления в совокупности с соответствием элементов СТ концепции «умный город» и расширением взаимодействия в рамках её идеологии с системами электроснабжения и газоснабжения являются отличительными особенностями СТ 4-го поколения. Считается, чтобы обладать системным свойством устойчивости во времени и пространстве, они должны отвечать ряду требований. К ним относятся:

- организация возможности подачи низкотемпературной теплоты в контуры систем отопления и горячего водоснабжения (ГВС) новых и существующих зданий;
- создание в ближайшем будущем систем, позволяющих использовать для отопления теплоноситель с температурой не более 50 °С прямой и около 20 °С обратной сетевой воды. Такие условия, в частности, могут быть созданы за счёт увеличения поверхности теплообмена радиаторов, применения теплообменников, встроенных в ограждающие конструкции (пол, стены и потолок), и воздушного отопления;
- минимизация расстояния от теплообменника системы вентиляции и ГВС до конечного потребителя;
- внедрение адаптивных систем управления, применение которых на основе прогнозных данных по метеосостояниям поможет рассчитывать потребность в тепловой энергии для каждой комнаты. Данные системы управления позволят производить балансировку требуемой тепловой энергии в течение суток и понизить пиковые нагрузки;
- использование теплопроводов со сдвоенными теплопроводами в одной изоляции, когда подающая труба находится в центре, а обратная в точке равенства температур изоляции и обратной сетевой воды, что позволит уменьшить тепловые потери, а тем самым исключить потери тепловой энергии от обратного трубопровода;
- улучшение качества изоляции трубопроводов, воздухопроводов и теплообменных аппаратов за счёт применения улучшенных теплоизолирующих материалов.

Критерием применимости является повышение энергетической и экологической эффективности, а также возможность интеграции в состав интеллектуальных энергетических систем при условии экономической целесообразности достигаемых эффектов.

### **Обоснование необходимости оптимизации системы автоматизации тепловых пунктов**

Индивидуальные тепловые пункты зданий (ИТП) работают без постоянного присутствия обслуживающего персонала. Оператор в течение рабочей смены выполняет обходы закрепленных за ним 12-15 тепловых пунктов. Основная задача – поддержание температуры внутри жилых помещений от +18 °С до +22 °С [1-4]. В настоящее время в ИТП предусматривается размещение оборудования, арматуры, приборов контроля, управления и автоматизации, посредством которых осуществляется:

- контроль параметров теплоносителя;
- регулирование расхода теплоносителя и распределение его по системам потребления теплоты;
- отключение систем потребления теплоты;
- защита местных систем от аварийного повышения параметров теплоносителя;
- заполнение и подпитка систем потребления теплоты;
- учет тепловых потоков и расходов теплоносителя.

Для учета расхода тепловых потоков и расхода воды теплосети предусмотрен в тепловом пункте прибор учета тепловой энергии в соответствии с «Правилами учета отпуска тепловой энергии».

Автоматизация тепловых пунктов обеспечивает:

- поддержание заданной температуры воды 60 гр. С<sup>0</sup>, поступающей в систему горячего водоснабжения путем воздействия на исполнительные механизмы клапана Г-У;
- регулирование подачи теплоты (теплого потока) в системы отопления в зависимости от изменения параметров наружного воздуха с целью поддержания заданной температуры воздуха в отапливаемых помещениях путем воздействия на исполнительный механизм клапана Т-У.

Данная система не использует преимуществ современных схем автоматизации ни для систем отопления, ни для систем вентиляции здания. Становится возможным сформулировать задачи оптимизации системы автоматизации тепловых пунктов.

- 1) Обеспечить автоматизированный интеллектуальный анализ надёжности и энергетической эффективности работы теплового пункта в соответствии с технологической картой.

Работа системы диспетчеризации должна быть организована следующим образом:

- по запросу с верхнего уровня (ВУ) от АС «Диспетчеризация» передавать текущие значения, архивы и журналы параметров в АС «Диспетчеризация»;
  - при возникновении аварийной ситуации (события) отправлять специальное (мгновенное инициативное) сообщение на ВУ;
  - на основании мгновенных значений параметров формировать архивы и журналы состояний системы;
  - принимать сигналы для синхронизации времени.
- 2) Реализовать систему автоматизации ИТП на одном контроллере совместно с системой диспетчеризации и обеспечить исполнение системой автоматизации следующих задач:
    - регулирование заданных значений температуры и давления в системах отопления и ГВС, заданного перепада давления между подающим и обратным трубопроводами теплосети по ПИД-закону регулирования, а также изменение/коррекция работы ПИ- и ПИД-регулятора (коэффициенты регулирования  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $T_d$ , ШИМ, ВИМ и т.д.)
    - реализацию управления насосными группами в автоматическом и в ручном режимах:
      - задание задержки включения между насосными группами ХВС, ГВС, ПО, ЦО (вентиляции), системы компенсации температурного расширения, возможность изменения значений;
      - задание задержки времени между переключением насосов в группе (по АВР и в динамическом режиме);
      - включение дополнительного насоса (для групп ХВС, ГВС) по сигналу (дискретному или аналоговому) при недостаточной производительности рабочего (при его наличии);
      - задание очередности работы насосов в группе, дистанционное исключение насосов из группы;
      - задание динамических режимов работы насосов, по календарной дате, по часам наработки;
      - задание времени разгона при включении/переключении насоса при работе с частотным приводом;
      - задание числа автоматических сбросов (количество перезапусков) состояния «Авария» со всех насосов группы;
      - отключение групп насосов ХВС и ГВС при срабатывании противопожарных насосов.
    - останов исполнительного механизма (ИМ) регулирующего клапана(ов) системы ГВС при достижении значения температуры в подающем трубопроводе ГВС 70°C, а при превышении значения, его (их) аварийное закрытие;
    - запуск насоса подпитки отопления (ПО) и открытие клапана подпитки при отсутствии сигнала нижнего уровня расширительного бака (далее – РБ) открытого типа или по сигналу от датчика-реле давления на обратном трубопроводе системы отопления для мембранного бака;
    - отключение насоса ПО и закрытие клапана ПО при появлении сигнала верхнего уровня РБ открытого типа (независимо от времени заполнения системы отопления) или по сигналу от датчика-реле давления на обратном трубопроводе системы отопления для мембранного бака или по сигналу от датчика-реле давления на обратном трубопроводе системы отопления для мембранного бака;
    - задание времени работы насоса ПО с последующим отключением и закрытием клапана ПО (независимо от отсутствия сигнала верхнего уровня);
    - Реализовать алгоритм автоматического отключения насосов ХВС и ГВС при падении давления в городской сети водопровода ниже 0,6 кгс/см<sup>2</sup>.
  - 3) Реализовать схему управления насосами ГВС и ХВС в режиме частотного регулирования (ЧРП).
  - 4) В системах ГВС ЦТП реализовать автоматическое регулирование температуры горячей воды с нормативным понижением температуры в периоды минимального водоразбора:
  - 5) В системах ЦО и Вентиляции ЦТП реализовать автоматическое регулирование теплопотребления в зданиях с нормативным понижением температуры в ночной период и выходные дни
  - 6) Выбрать оптимальный режим ЧРП насосов ГВС:
    - стабилизацию давления на напоре насоса ГВС;
    - стабилизацию давления на всосе насоса ГВС;
    - стабилизацию температуры обратной ветви ГВС.
  - 7) Реализовать последовательное включение оборудования ИТП при пропадании питания (перезапуск оборудования) в установленном порядке и с заданием выдержки времени включения между насосными группами ХВС, ГВС, ПО, ЦО (вентиляции);

- 8) Реализовать режим выдачи рекомендаций инженеру-технологу/оператору ТП по приведению текущих параметров работы ИТП в соответствии с технологической картой.

На основании перечисленного из системы диспетчеризации ИТП должны производиться мониторинг, контроль и передача и передача на верхний уровень следующих параметров и сигналов:

Входные параметры

1. Давление в подающем трубопроводе теплосети P1;
2. Давление в обратном трубопроводе теплосети P2;
3. Давление в подающем трубопроводе теплосети после клапана перепада Давления P1.1;
4. Температура в подающем трубопроводе теплосети T1 из теплосчетчика;
5. Температура в обратном трубопроводе теплосети T2 из теплосчетчика;
6. Давление в городском водопроводе холодной воды Pгор;
7. Температура наружного воздуха Tнв;
8. Наличие напряжения на вводе 1 (контроль фазы);
9. Наличие напряжения на вводе 2 (контроль фазы);

Выходные параметры

10. Давление в подающем трубопроводе системы отопления P3;
11. Давление в обратном трубопроводе системы отопления P4;
12. Температура в подающем трубопроводе отопления T3;
13. Температура в обратном трубопроводе отопления T4;
14. Давление в подающем трубопроводе системы ГВС 1 зона P7.1;
15. Давление в подающем трубопроводе системы ГВС 2 зона P7.2;
16. Давление в циркуляционном трубопроводе системы ГВС 1 зона P13.1;
17. Давление в циркуляционном трубопроводе системы ГВС 2 зона P13.2;
18. Температура в подающем трубопроводе ГВС (ВПГ1) T7.1;
19. Температура в подающем трубопроводе ГВС (ВПГ2) T7.2;
20. Температура в циркуляционном трубопроводе ГВС 1 зона T13.1;
21. Температура в циркуляционном трубопроводе ГВС 2 зона T13.2;
22. Давление в подающем тр-де холодной воды 1 зона Pхв 1;
23. Давление в подающем тр-де холодной воды 2 зона Pхв 2;
24. Объемный расход холодной воды на нужды ГВС 1 зона (ВВГ1) Vгв1;
25. Объемный расход холодной воды на нужды ГВС 2 зона (ВВГ2) Vгв2;

Параметры от теплосчетчика на вводе в ЦТП

26. Расход тепловой энергии, Гкал Q;
27. Температура в подающем трубопроводе T1;
28. Температура в обратном трубопроводе T2;
29. Массовый расход теплоносителя в подающем тр-де, т/час G1;
30. Массовый расход теплоносителя в обратном тр-де, т/час G2;
31. Расход теплоносителя на подпитку отопления Gтп;
32. Время работы теплосчетчика, (час) Chr;
33. Время неработы теплосчетчика при различных ошибках, (час) Тош;

Эксплуатационные параметры/состояние работы оборудования

34. Насосы ХН1, ХН2, ХН3 1 зона ХВС1-3;

Работа/стоп/резерв/ авария/останов;

Режим работы от сети/ЧРП:

35. Насосы ХН1, ХН2 2 зона ХВС1-2;

Работа/стоп/резерв/ авария/останов

36. Насосы ГН1, ГН2 1 зона ГВС1-2;

Работа/стоп/ резерв/авария/останов;

Режим работы от сети/ЧРП:

37. Насосы ГН1, ГН2 2 зона ГВС1-2;

Работа/стоп/ резерв/авария/останов:

38. Насосы НО1, НО2 НО1-2;

Работа/стоп/резерв/ авария/останов:

39. Насосы подпитки ПО1, ПО2 ПО1-2;

Работа/стоп/ резерв/авария/останов:

40. Авария АПЧ ХВС СЧПх;

41. Авария АПЧ ГВС 1 зона СЧПг;

42. Открытие дверей (несанкционированный доступ) Дверь;

43. Температура внутреннего воздуха (помещение ЦТП) Tвв;

44. Влажность воздуха на ЦТП Mвв;

45. Нарушение изоляции ППУ Сппу;

46. Намокание изоляции ППУ Сппу;

47. Есть/отсутствует нижний уровень в расширительном баке УРПНО;
48. Есть/отсутствует верхний уровень в расширительном баке УРПНО;
49. Есть/отсутствует аварийный уровень в расширительном баке УРПНО;
50. Время нахождения оборудования в каждом из перечисленных состояний;
51. Состояние группы насосов ХН 1 зона автоматический/ручной ГНХВС1;
52. Состояние группы насосов ХН 2 зона автоматический/ручной ГНХВС2;
53. Состояние группы насосов ГН 1 зона автоматический/ручной ГНГВС1;
54. Состояние группы насосов ГН 2 зона автоматический/ручной ГНГВС2;
55. Состояние группы насосов НО автоматический/ручной ГНЦО;
56. Состояние группы насосов ПО автоматический/ручной ГНПО;
57. Состояние регулятора отопления автоматический/ручной РОТ;
58. Состояние регулятора подпитки отопления автоматический/ручной РПО;
59. Состояние регулятора темп. ГВС1 автоматический/ручной РГВС1;
60. Состояние регулятора темп. ГВС2 автоматический/ручной РГВС2;
61. Состояние регулятора давл. т/с автоматический/ручной РТС;
62. Состояние блока бесперебойного питания (автомат основного питания), входное напряжение ИБП АОП;
63. Состояние блока бесперебойного питания (автомат резервного питания), выходное напряжение ИБП АРП.

#### **Расчет комбинированной одноконтурной АСР с ПИ-регулятором**

Учёт дополнительной информации в случае применения автоматической структуры регулирования (АСР) с компенсацией возмущений. Действие внешнего возмущения  $\lambda(t)$  компенсируется введением заранее рассчитанного воздействия, которое с необходимым упреждением может быть подано на вход регулятора совместно с задающим воздействием (рис. 1). Введение добавочного канала информации здесь не приводит к появлению нового замкнутого контура передачи воздействия и, следовательно, такое усложнение не влияет на устойчивость.

Необходимо рассчитать параметры настройки одноконтурной АСР с ПИ – регулятором таким образом, чтобы линейный интегральный показатель (квадратичный, модульный) был минимальным, а запас устойчивости был не хуже заданного.

Построим расширенную КЧХ объекта по каналу регулирующего воздействия для трех заданных значений корневого показателя колебательности  $m_1 = 0$  (на границе запаса устойчивости);  $m_2 = 0,221$ ;  $m_3 = 0,366$  (рис. 2). Для минимизации линейного интегрального показателя необходимо, чтобы отношение  $K_p \setminus K_i$  было максимально возможным (табл. 1). На основании полученных данных выполнено построение переходных процессов комбинированной одноконтурной АСР с ПИ-регулятором и компенсирующим регулятором по каналу возмущающего воздействия (рис. 3).

Расчёт переходных процессов комбинированной одноконтурной АСР с ПИ-регулятором и компенсирующим регулятором по каналу возмущающего воздействия становится возможным выполнить посредством применения обученной цифровой модели на примере системы теплоснабжения здания. В результате выполнения уточняющих расчётов определяются наиболее эффективные параметры регуляторов, реализация которых позволяет настроить системы вентиляции для достижения оптимального управления объектом.

#### **Определение параметров данных цифровой модели**

Проведённый выше анализ демонстрирует, что для формирования базы данных цифровой модели системы теплоснабжения здания на основе уже собираемых параметров и индикаторов, требуется относительно небольшая база данных. Проведённый анализ целесообразности требуемой дискретизации сигналов по времени показывает, что для отслеживания, например, таких параметров, как тепловая инерция здания требуется накопление данных по измерениям не чаще чем 1 раз в 5 минут. В таком случае число измерений составит 105,1 тыс. строк в год.

Поскольку для отслеживания по тепловому пункту было выбрано 63 индикатора, то общий объём базы данных в год составит 6,62 млн значений. Объём цифровой модели может быть увеличен путем добавления новых данных или при увеличении степени дискретизации по времени. Уменьшение объёма данных приведёт к существенному снижению точности цифровой модели.

Для данного графика степень затухания - относительное уменьшение соседних амплитуд переходной характеристики (берем первую и третью амплитуды) по каналу возмущения без компенсирующего регулятора  $\psi = 0,816$ . Для данного графика степень затухания с компенсирующим регулятором  $\psi = 0,813$ . Применение компенсирующего регулятора позволило:

- снизить линейный интегральный показатель точности управления в 2,3 раза;
- снизить динамическое отклонение в 5,2 раза.

Создание цифрового двойника здания позволяет ускорить процессы оптимизации и тонкой настройки системы вентиляции существующих зданий, сократить ошибки и повысить экономичность эксплуатируемой установки. Разработка модели здания возможна на этапе эксплуатации здания. Создание цифрового двойника позволяет протестировать и оптимизировать различные параметры системы теплоснабжения объекта.

1. [СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и \(или\) безвредности для человека факторов среды обитания"](https://docs.cntd.ru/document/573500115) [Электр. ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>. Дата обращ.: 10.05.2023.
2. ГОСТ 30494-2011 "Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях" [Электр. ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200095053>. Дата обращ.: 10.05.2023.
3. ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [Электр. ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200003608>. Дата обращ.: 10.05.2023.
4. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 18 мая 2010 г. N 58 "Об утверждении СанПиН 2.1.3.2630-10 "Санитарно-эпидемиологические требования к организациям, осуществляющим медицинскую деятельность" [Электр. ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902217205>. Дата обращ.: 10.05.2023.

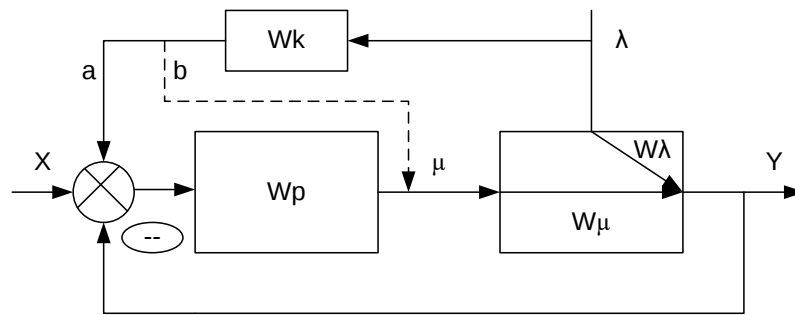


Рис. 1 Схема комбинированной одноконтурной АСР

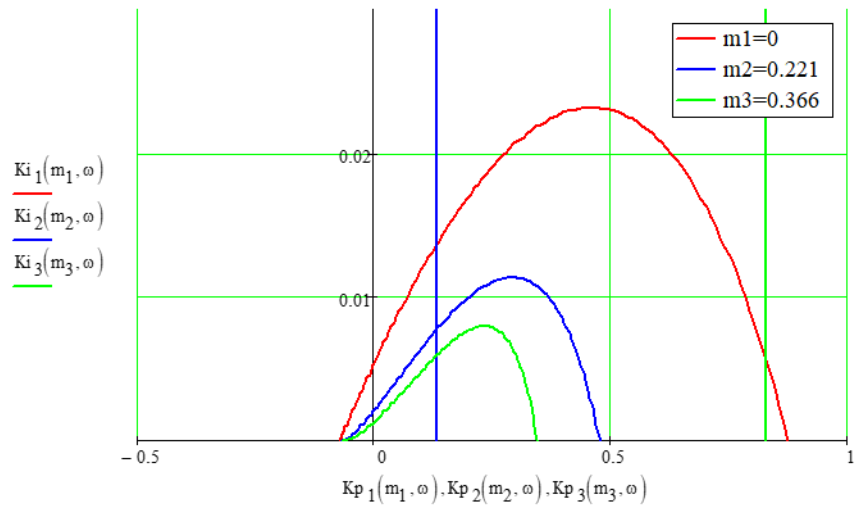


Рис. 2. Зависимость Ки от Кп

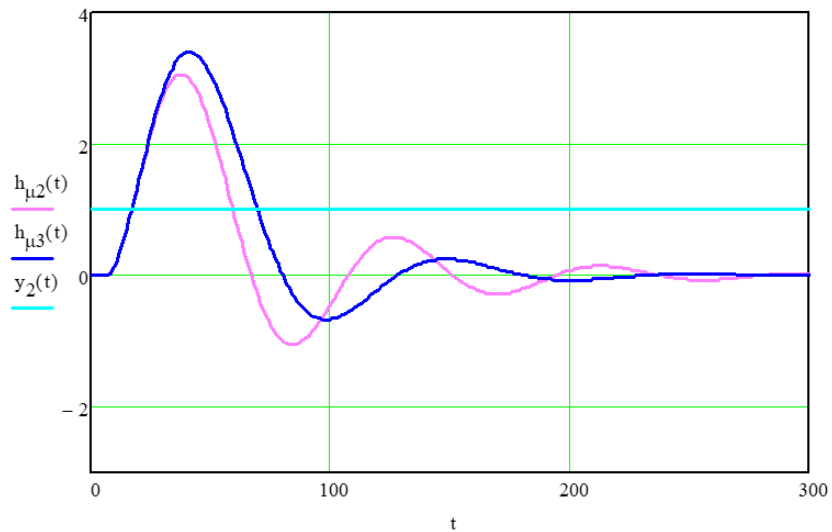


Рис.3. График переходных процессов одноконтурной замкнутой АСР с ПИ-регулятором и объектом по каналу регулирующего воздействия  $\mu$  при  $m=0.366$  и  $m=0.221$

Табл. 1. Значения  $K_p$  и  $K_i$ , определённые из максимумов графика функций

| $m$   | $K_p$  | $K_i$  | $T_i$  |
|-------|--------|--------|--------|
| 0     | 0,4576 | 0,0232 | 19,759 |
| 0,221 | 0,2997 | 0,0113 | 26,481 |
| 0,366 | 0,2348 | 0,0079 | 29,575 |

**О формировании базы данных цифровой модели системы теплоснабжения здания**

Система вентиляции здания является подсистемой для системы теплоснабжения объекта. Распределение тепловой энергии происходит из индивидуального теплового пункта (ИТП). Автоматика отпуска тепловой энергии в систему вентиляции должна быть согласована и работать синхронизировано с автоматикой ИТП. Формирование цифровой модели системы вентиляции здания требует интеграции и взаимодействия систем управления с цифровой моделью системы теплоснабжения здания. Современное состояние системы мониторинга и управления ИТП имеет существенный потенциал развития с точки зрения автоматизированности и пригодности для последующего формирования цифрового двойника. В статье приведено современный уровень автоматизации ИТП, показаны направления развития. Оценен объем информационной базы и период накопления информации для создания цифровой модели.

**С. В. Гужов<sup>1</sup>, А.А. Арбатский<sup>2</sup>, Д.В. Тороп<sup>1</sup>**

1 - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

2 - НИИ «Инженерных климатических систем и электроники»

Сергей Вадимович Гужов - к.т.н., доцент

Андрей Андреевич Арбатский - к.т.н., генеральный директор

Дарья Владимировна Тороп - студент

общеобменная вентиляция, цифровая модель, база данных, индивидуальный тепловой пункт, управление, автоматизация

On the formation of a database of a digital model of the building heat supply system

S. V. Guzhov<sup>1</sup>, A. A. Arbatsky<sup>2</sup>, D.V. Torop<sup>1</sup>

1 - Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MPEI", Moscow, Russian Federation

2 - Research Institute "Engineering climate systems and electronics"

Sergey Vadimovich Guzhov - Ph.D., Associate Professor

Andrey Andreevich Arbatsky - Ph.D., Director

Daria Vladimirovna Torop - student

The building ventilation system is a subsystem for the facility's heat supply system. The distribution of thermal energy comes from an individual heating point (ITP). Automatic release of thermal energy into the ventilation system must be coordinated and work in sync with the automation of the ITP. The formation of a digital model of the building ventilation system requires the integration and interaction of control systems with a digital model of the building's heat supply system. The current state of the ITP monitoring and control system has significant development potential in terms of automation and suitability for the subsequent formation of a digital twin. The article presents the current level of ITP automation, shows the directions of development. The volume of the information base and the period of accumulation of information for creating a digital model are estimated.

general ventilation, digital model, database, individual heat point, control, automation

1. SanPiN 1.2.3685-21 "Gigiyenicheskiye normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya" [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans] Web-source: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>. Acces data: 10.05.2023. [In Russian]

2. GOST 30494-2011 "Zdaniya zhilye i obshchestvennyye. Parametry mikroklimata v pomeshcheniyakh" [Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters] Web-source: <https://docs.cntd.ru/document/1200095053>. Acces data: 10.05.2023. [In Russian]

3. GOST 12.1.005-88 «Obshchiye sanitarno-gigiyenicheskiye trebovaniya k vozdukhу rabochey zony» [General sanitary and hygienic requirements for the air of the working area] Web-source: <https://docs.cntd.ru/document/1200003608>. Acces data: 10.05.2023. [In Russian]

4. Postanovleniye Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 18 maya 2010 g. N 58 "Ob utverzhdenii SanPiN 2.1.3.2630-10 "Sanitarno-epidemiologicheskkiye trebovaniya k organizatsiyam, osushchestvlyayushchim meditsinskuyu deyatel'nost'" [Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of May 18, 2010 N 58 "On approval of SanPiN 2.1.3.2630-10 "Sanitary and epidemiological requirements for organizations engaged in medical activities"] Web-source: <https://docs.cntd.ru/document/902217205>. Acces data: 10.05.2023. [In Russian]