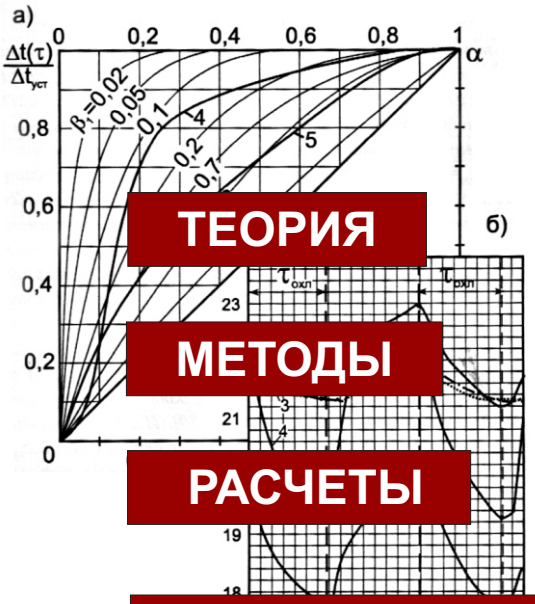
www.engstroy.spb.ru

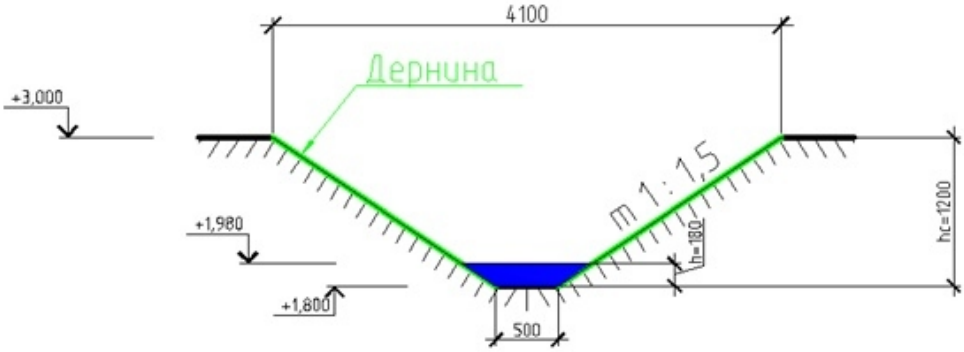
Инженерно-строительный журнал

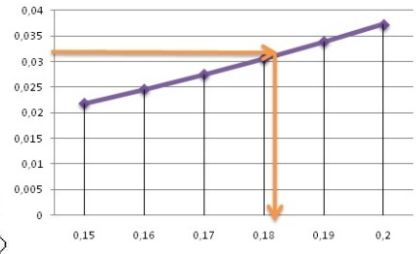
научно-прикладное издание

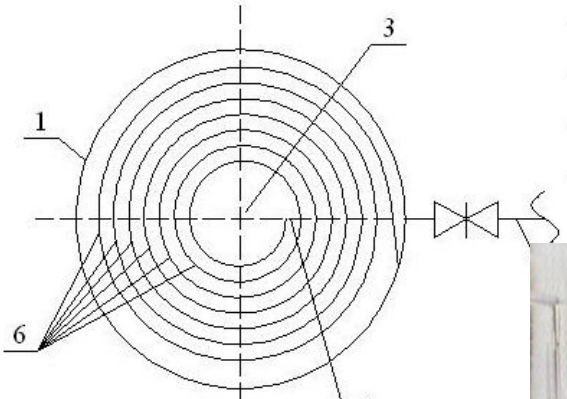
ISSN 2071-4726

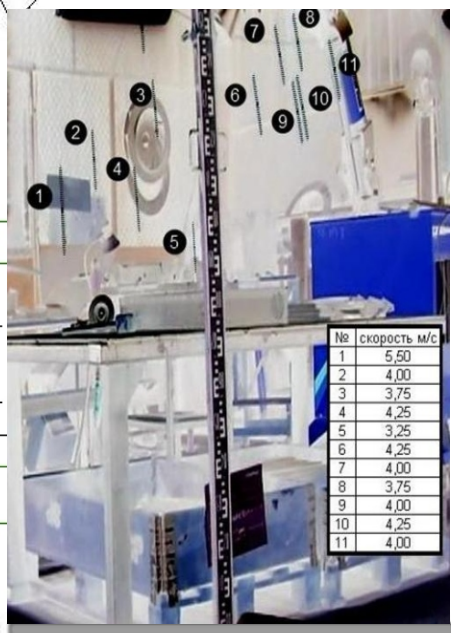
№5(23) июль-август 2011

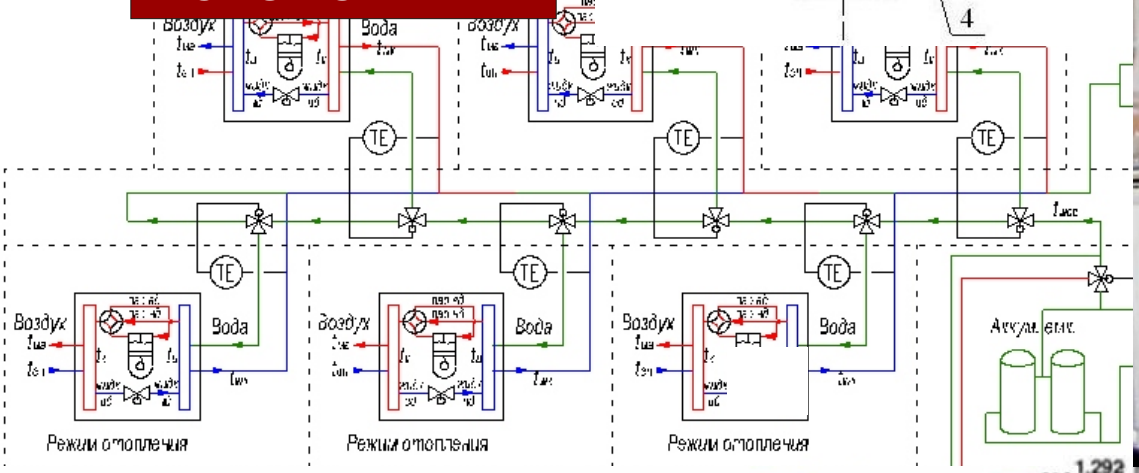


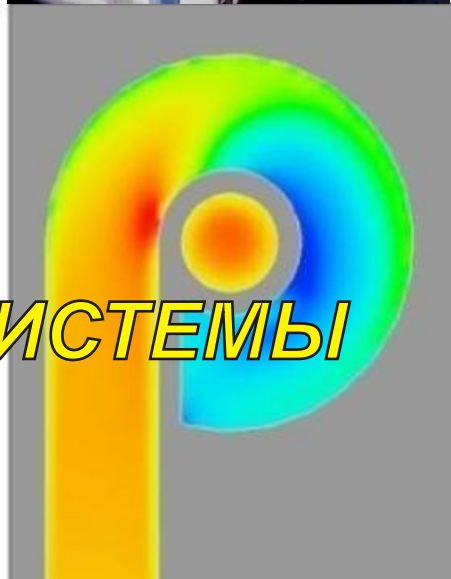












ТЕОРИЯ

МЕТОДЫ

РАСЧЕТЫ

КОНСТРУКЦИИ

ЭКОНОМИКА

ТЕМА НОМЕРА: ГИДРАВЛИКА. ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ

Заведующий кафедрой,
д.т.н., профессор
Ватин Николай Иванович

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Инженерно-строительный факультет

Кафедра «Технология, организация и экономика строительства» (ТОЭС)

Международные магистерские программы по направлению «Строительство»

Что такое магистратура?

- получение квалификации, признанной во всем мире;
- фундаментальное профессиональное образование;
- ускоренный путь к получению степени кандидата технических наук;
- получение знаний и умений, востребованных работодателями на производстве и в науке;
- реальное участие в научно-исследовательской и педагогической деятельности.

Обучение в магистратуре проходит в течение 2 лет, на бюджетной или контрактной основе, по очной или заочной форме. Иногородним предоставляется общежитие.

Выберите одну из наших магистерских программ:

1. Автоматизированное проектирование зданий и сооружений
2. Инженерные системы зданий и сооружений
3. Организация и управление инвестиционно-строительными проектами
4. Теория и практика организационно-технологических решений
5. Энергосбережение и энергоэффективность (при финансовой поддержке ЕС)
6. Международные инвестиционно-строительные проекты (при финансовой поддержке ЕС)

Обучение в ведущих европейских вузах

Каждому магистру предоставляется возможность бесплатной стажировки (от 1 семестра до года) в одном из европейских строительных вузов-партнеров ГОУ СПбГПУ.

Особенности обучения на кафедре:

- индивидуальная работа с каждым магистром, включающая активную научно-исследовательскую работу и опыт педагогической деятельности;
- регулярные выступления на семинарах, конференциях, научных форумах;
- активное взаимодействие преподавателей и студентов в ходе совместной проектной и научно-исследовательской деятельности;
- оперативное обновление учебных дисциплин;
- учебный процесс, построенный на современных компьютерных технологиях в строительстве;
- постоянное общение с представителями ведущих строительных и проектных организаций.

Заочная магистратура как второе высшее образование

Программа ориентирована, прежде всего, на обучение практикующих специалистов, в том числе с техническим «нестроительным» образованием:

- возможность обучения без отрыва от работы;
- использование новейших технологий дистанционного обучения;
- самостоятельный выбор приоритетных направлений обучения.

Контакты

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 204, 301, 201
297-59-49, 535-79-92, 552-94-60, www.stroikafedra.spb.ru

Http://www.engstroy.spb.ru – полнотекстовая версия журнала в сети Интернет. Бесплатный доступ, обновление с каждым новым выпуском.

Инженерно-строительный журнал
научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

Свидетельство о государственной регистрации: ПИ №ФС77-38070, выдано Роскомнадзором

Специализированный научный журнал

Включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Адрес редакции:

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 204

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Научный редактор:

Николай Иванович Ватин

Литературный редактор:

Ирина Ипполитовна Смирнова

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф., ректор ГОУ СГАСУ М.И. Бальзанников;
к.т.н., проф., проректор по перспективным проектам ФГБОУ ВПО СПбГПУ А.И. Боровков;
д.т.н., проф., декан факультета ГОУ ПГУАС О.В. Тараканов;
д.т.н., проф., зав. каф. ГОУ СПбГПУ В.В. Лалин;
к.т.н., директор РУП «Институт БелНИИС» М.Ф. Марковский;
д.т.н., проф., зав. каф. ГОУ СПбГПУ Б.Е. Мельников;
и другие.

Полный список редсовета и редколлегии – на веб-сайте журнала.

Установочный тираж 1000 экз.

Содержание

СОБЫТИЯ

Энергоаудит зданий и промышленных предприятий 2

КОНСТРУКЦИИ

Ватин Н.И., Гиргидов А.А., Стрелец К.И. Численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне 5

Давыдов Е.И., Лямаев Б.Ф. Исследование и расчет вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой 10

МЕТОДЫ

Арефьев Н.В., Волкова Ю.В., Павлов С.Я., Олешко В.А. Разработка и технико-экономическое сопоставление вариантов проектных решений по предотвращению поступления поверхностных и грунтовых вод на территорию Металлургического терминала порта Усть-Луга 16

Ватин Н.И., Стрелец К.И., Китаин М.Б. Определение характеристик сварочных искр для расчета их удаления в циклоне 25

Самарин О.Д., Азивская С.С. О численном расчете коэффициента ассимиляции переменных теплопоступлений при автоматизации систем обеспечения микроклимата 31

РАСЧЕТЫ

Сотников А.Г. Математический анализ качества поддержания параметров в прецизионных технологических СКВ 34

Козинец Г.Л. Определение динамических характеристик сооружений, контактирующих с водой, на примере арочной бетонной плотины Саяно-Шушенской ГЭС 43

ТЕОРИЯ

Гиргидов А.Д. Изменение диссипации энергии при переходе от ламинарного режима к турбулентному 49

ЭКОНОМИКА

Аверьянова О.В. Экономическая эффективность энергосберегающих мероприятий 53

Солдатенко Т.Н. Экспертно-статистический метод оценивания параметров управляющих воздействий на инженерные сети зданий в условиях неопределенности 60

При перепечатке ссылка на издание обязательна

В дизайне обложки использованы авторские иллюстрации к статьям

Контакты:

Тел. (812) 297-59-49 E-mail: engstroy@inbox.ru Web: Http://www.engstroy.spb.ru

Энергоаудит зданий и промышленных предприятий

02 августа 2011 г. прошло первое заседание нового комитета Торгово-промышленной палаты Санкт-Петербурга. Комитет по предпринимательству в сфере строительства и рынку недвижимости сформировался весной 2011 г., и теперь он начал свою работу. На повестке дня были такие актуальные вопросы как применение в строительстве ФЗ-94 «О размещении заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг для государственных и муниципальных нужд» от 21.07.2005, Постановления Правительства РФ «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» от 16.02.2008.

Активную дискуссию вызвал первый вопрос повестки, «О задачах промышленных предприятий и строительных организаций по осуществлению энергетического обследования». Докладчик д.т.н., профессор, заместитель председателя Комитета Александр Александрович Журавлев рассказал о том, что помимо организаций с государственным участием обязательному энергоаудиту в соответствии с законодательством подлежат промышленные предприятия, потребляющие за год энергоресурсов более чем на 10 млн руб. 90% промышленных предприятий Санкт-Петербурга относятся к этой группе. Но пока активность этих организаций не очень высока.

Между тем у них есть два варианта: либо самим стать энергоаудиторской компанией, подготовив четырех энергоаудиторов и вступив в соответствующую саморегулируемую организацию, либо обратиться к стороннему энергоаудитору, уже состоящему в СРО. А.А. Журавлев отметил, что вскоре первая возможность может быть законодательно запрещена. На данный момент, по его данным, в России насчитывается 102 саморегулируемые организации в области энергетического обследования и около 4000 фирм-энергоаудиторов. По оценкам специалистов, они физически не смогут провести обязательный энергоаудит всех, кто в нем нуждается, в сроки, оговоренные в законе №261 «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» – до конца 2012 г. Тем не менее, Министерство энергетики РФ по-прежнему утверждает, что сроки переноситься не будут.

В законе оговорены штрафные санкции для не прошедших обязательное энергетическое обследование. Но некоторые бюджетные организации, которые не получают экономической выгоды от энергосбережения, предпочитают уплатить штраф, нежели проводить регулярный энергоаудит. Тем не менее, понятно, что рано или поздно эту процедуру придется проходить всем.

Итогом энергетического обследования является энергетический паспорт предприятия (для Минэнерго), а также отчет (для предприятия), включающий программу энергосбережения. На данный момент, по данным А.А. Журавлева, из 500 энергетических паспортов, поступивших на рассмотрение в Минэнерго, только 5 было принято к регистрации в реестре. Остальные либо еще проходят процедуру, либо возвращены в СРО на доработку. СРО энергоаудиторов несут реальную ответственность за работу своих членов: именно СРО после внутренней проверки направляет энергопаспорта в Минэнерго. Если паспорт возвращают на доработку, за это платит не заказчик, а исполнитель и СРО.

Помимо обязательного энергетического обследования, существует и добровольное – его проводят предприятия, желающие внедрять энергосбережение из экономических соображений. По добровольному энергоаудиту также существует реестр в Минэнерго.

Что касается энергетического обследования зданий и сооружений, здесь разделяют построенные и проектируемые здания. К проектируемым зданиям существуют обязательные требования по энергоэффективности: в соответствии с Приказом Минрегионразвития №224 от 17.05.2011 энергосберегающие мероприятия являются обязательным разделом пояснительной записки к проекту; в графической части обязательно должны присутствовать приборы учета. Таким образом, вновь строящиеся дома должны соответствовать требованиям энергоэффективности.

Что касается эксплуатируемых зданий, на данный момент их энергоаудит является добровольным. Тем не менее, в Приказе Минрегионразвития №161 от 08.04.2011 указываются классы энергоэффективности эксплуатируемых многоквартирных домов, что позволяет предполагать в дальнейшем введение обязательного энергоаудита и для этой категории.

В.М. Якубсон

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет»
Инженерно-строительный факультет**
www.stroikafedra.spb.ru

Производственное, научно-исследовательское и
проектно-конструкторское учреждение
«ВЕНЧУР»
www.ozis-venture.ru

ООО «**Просек Рус**»
www.proceq-russia.ru

Приглашают **14.10.2011** на

II научно-практическую конференцию

«Проблемы обследования зданий и сооружений и пути их решения»

Цели конференции

1. Обсудить основные проблемы, существующие в области обследования зданий и сооружений на сегодняшний день, и наметить пути их решения.
2. Произвести обмен передовым опытом ведущих организаций и специалистов в области обследования.
3. Наладить деловые контакты между специалистами данной области проектно-изыскательских работ.

Ожидается участие

1. Белый Григорий Иванович, проф., д.т.н. – зав. кафедрой СПбГАСУ.
2. Деркач Валерий Николаевич, к.т.н.- зам. директора БелНИИС (Брест, Белоруссия).
3. Землянский Анатолий Андреевич, проф., д.т.н. – директор БИТТиУ (Балаково).
4. Курлапов Дмитрий Валерьевич, доц., к.т.н.- зав кафедрой ВИТИ.
5. Огородник Владимир Михайлович, к.т.н. – НПО «Наука-Строительству».
6. Павлов Игорь Валерьевич, доц., к.т.н. – профессор СПбСЗТУ.
7. Пичугин Сергей Нинелович, к.т.н. – директор ЗАО «БЭСКИТ».
8. Римшин Владимир Иванович, проф., д.т.н. – декан МГА КХиС (Москва).
9. Савин Сергей Николаевич, доц., д.т.н.- филиал ОАО «26 ЦНИИ».
10. Соколов Владимир Алексеевич, проф., к.т.н. – зав. кафедрой СПбГПУ.
11. Штенгель Вячеслав Гедалиевич, в.н.с, к.т.н. – ВНИИГ им. Веденеева.

С тематикой и результатами предыдущей конференции, состоявшейся 15.10.2010, можно ознакомиться в №17 Инженерно-строительного журнала:
http://www.engstroy.spb.ru/index_2010_07/index_2010_07.html

Место и время проведения конференции

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», 16-й учебный корпус (Гражданский пр., д. 28, к.2).
Ориентировочное время начала конференции 10-00 (будет уточнено позднее).
Конференция будет проходить в течение 1 дня.

**За дополнительной информацией и по вопросам подготовки материалов для СМИ обращаться по телефону 8 (812) 535-57-82 или писать по адресу o.zis@mail.ru
Улыбину Алексею Владимировичу**

24-я международная конференция

BEM&FEM-2011

Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов

Санкт-Петербург, Россия, 28-30 сентября 2011

Организаторы:

- Учреждение Российской академии наук ИПМаш РАН; Санкт-Петербургский научный центр РАН;
- Научный совет РАН по механике деформируемого твердого тела; Научный совет РАН по строительной механике;
- Научный совет РАН по горению и взрыву; Санкт-Петербургский государственный университет;
- Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет;
- Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;
- Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;
- Санкт-Петербургский государственный инженерно-экономический университет;
- Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна;
- НИЦ «Динамика» СПбГУ;
- ООО «ТЕХСОФТ»;
- секция строительной механики и надежности конструкций Санкт-Петербургского Дома ученых РАН им. М. Горького.

Конференция посвящается рассмотрению перспективных направлений математического моделирования задач механики деформируемого твердого тела, жидкости и газа, сложных физических процессов, имеющих место при создании современных материалов и конструкций с позиции их фундаментальной и прикладной значимости.

Основные научные направления

- *динамика и прочность машин и конструкций. Методы идентификации и оптимизации;*
- *динамические и статические задачи теории устойчивости;*
- *компьютерные технологии и программное обеспечение в моделировании конструкций;*
- *механика вязкоупругопластичности, повреждаемости и разрушения материалов и конструкций;*
- *механика композитных материалов;*
- *наномеханика и проблемы повышения прочности материалов;*
- *проблемы гидроаэроупругости;*
- *фундаментальные проблемы живучести и безопасности инженерных сооружений;*
- *численные методы решения задач строительной механики и механики сплошной среды (наука, практика, образование).*

Приветствуется расширение тематики конференции, в частности, в области прикладных расчетно-экспериментальных исследований, направленных на повышение безопасности конструкций и сооружений.

Рабочие языки конференции - русский и английский.

Лучшие доклады будут опубликованы в журналах, включенных в перечень ВАК

Подробная информация на сайте www.bem-fem.ru

Адреса и телефоны для справок

Тел.: (+7911) 210 7439, (+7812) 771 99 35; (+7911) 941 8568.

E-mail: grossfrum@post.ru

Численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне

Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Н.И. Ватин;
к.т.н., доцент А.А. Гиргидов;
к.т.н., доцент К.И. Стрелец*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: циклон; гидравлическая крупность; распределение скорости; осевая скорость

Использование циклонов для удаления твердых и жидких включений (пыли, капель, взвешенных частиц) из газа (в частности воздуха) и из жидкостей (воды, нефти) обусловлено надежностью и простотой устройства при небольших капитальных и эксплуатационных затратах. В настоящей статье будем рассматривать циклоны, используемые для пылеудаления из воздуха рабочей зоны производственных помещений. Наиболее распространенным типом таких устройств является противоточный циклон с тангенциальным подводом воздуха (рис. 1).

В соответствии с [2], будем рассматривать циклон с цилиндрическим корпусом, с внутренним радиусом R и радиусом отводящей трубы r_0. При этом воздух подводится через входной патрубок прямоугольного сечения с вертикальным ребром h и горизонтальным ребром $b=(R-r_0)$ со скоростью v_0. Такие циклоны, как правило, имеют вертикальную ось z, и частицы пыли удаляются из потока за счет их движения к стенке циклона под действием сил инерции (в данном случае направленных перпендикулярно оси циклона и поэтому в дальнейшем называемых центробежными) [4]. Движение частиц вниз вдоль внешней стенки циклона происходит за счет осевой составляющей скорости v_z и под действием силы тяжести.

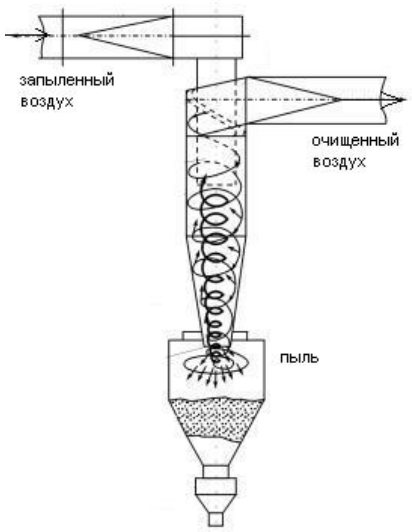


Рисунок 1. Противоточный циклон с тангенциальным локальным подводом воздуха [1]

При гидравлическом расчете циклонов винтовой поток пылесодержащего воздуха в рабочей части тела циклона считается однородным вдоль оси z, так что представляется возможным «расщепление» процесса удаления на две независимые части.

1. Осевой поток вдоль оси z со средней скоростью:

$$v_z = \frac{v_0 (R-r_0)^2}{\pi (R^2 - r^2)_0} \quad . \tag{1}$$

2. Тангенциальный осесимметричный поток, благодаря переносу которым частица пыли под действием сил инерции перемещается к стенке циклона и осаждается на ней. Тангенциальная скорость u_ε движения воздуха определяет величину центробежного ускорения, поэтому распределение ее значения вдоль радиальной координаты r является существенным фактором, от которого зависит эффективность пылеудаления в циклоне [4].

Для вычисления распределения тангенциальной скорости $u_\varepsilon = u_\varepsilon(r)$ обычно используют гипотезу о том, что внутри циклона формируется поле тангенциальной скорости такое же, как и в свободном вихре [2,5,6]:

$$u_\varepsilon = \frac{u_0 r_0}{r}, \tag{2}$$

где u_0 – скорость на внешней поверхности отводящего патрубка, которая определяется по средней скорости тангенциального движения u_ε согласно равенству:

$$v_\varepsilon (R-r) = \int_{r_0}^{R} \frac{u_\varepsilon^0 r_0}{r} dr = u_\varepsilon^0 r_0 \ln \frac{R}{r_0}. \tag{3}$$

При таком подходе считается, что ввиду малости осевой скорости v_z средняя тангенциальная скорость практически равна скорости подвода воздуха в циклон, т.е. $v_\varepsilon = v_0$, а поток не расширяется вдоль оси z и имеет форму спирали с постоянным шагом [7,8].

Приведенные выше гипотезы о поле скорости внутри циклона не имеют убедительной экспериментальной проверки, а поэтому достоверность результатов расчетов, основанных на таких модельных представлениях, всегда можно поставить под сомнение.

Дополнительным фактором, обуславливающем необходимость экспериментального изучения поля скорости воздуха внутри циклона, является практически полное отсутствие в литературе сведений о поле пульсационной скорости u'_r в воздушном потоке.

Максимальные значения этой пульсационной скорости ограничивают крупность частиц пыли, которые могут быть удалены из потока [9]. Более того, интересны для оценки эффективности циклона не только максимальные значения u'_r, но и распределение этой величины вдоль координаты r, так как центробежная гидравлическая крупность частиц $w_{цб}$, от которой зависит скорость u_r удаления частиц пыли от оси z [9], определяется следующей зависимостью:

$$w_{цб} = w\frac{(u_\varepsilon(r))^2}{gr}, \qquad (4)$$

где w – гравитационная гидравлическая крупность частиц [3,9,10];
g – ускорение силы тяжести.

Обязательным условием удаления частиц из циклона, т.е. их оседания на внешнюю стенку, является следующее: центробежная гидравлическая крупность должна быть больше пульсационной скорости во всех точках по координате r. В случае если $w_{цб} < u'_r$, частицы могут неограниченно долго перемещаться с окружной скоростью потока. Поэтому при увеличении пульсационной скорости эффективность пылеудаления, в особенности для мелких частиц, снижается. С этим связано ограничение по минимальной гидравлической крупности w удаляемых частиц.

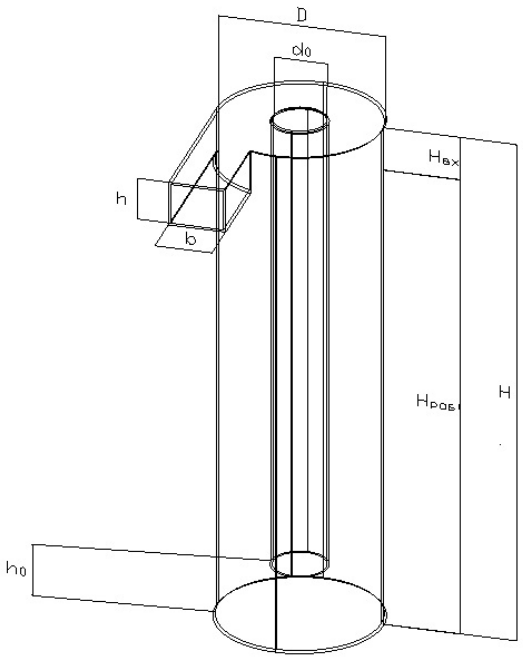


Рисунок 2. Схема циклона с подсоединением входного патрубка под углом 90°

Исследования поля осредненной и, в особенности, пульсационной скоростей на основе физического моделирования воздушного потока в теле циклона сопряжено с большими, порой технически непреодолимыми трудностями (существенно трехмерное движение воздуха, сложная конфигурация границ потока и т.п.) Поэтому было предпринято математическое моделирование турбулентного потока газа в циклоне, основанное на решении трехмерных уравнений Навье-Стокса. Возможность прямого численного решения этих уравнений для турбулентного потока в теле циклона не обеспечена современной вычислительной техникой, и поэтому была использована $k-\varepsilon$ модель турбулентности, что обеспечило не только определение поля тангенциальной скорости u_ε, но и возможность оценки поля пульсационной скорости. Вычисления выполнялись с помощью программного комплекса Flow 3D. При проведении численного моделирования скорости на входе в циклон задавались таким образом, чтобы обеспечивался развитый турбулентный режим.

В соответствии с экспериментальными данными, поток воздуха в циклоне можно разделить на входную часть, высотой $H_{вх}$, в которой после подвода воздуха происходит переформирование потока и образуется осесимметричный поток газа; рабочую часть, высотой $H_{раб}$, где сформировано осесимметричное поле скорости, на которой происходит осаждение частиц в расчетном режиме; выходную часть, высотой h_0, ниже рабочей зоны, где также происходит сильная деформация потока при его входе в отводящий патрубок (рис. 2).

Во входной части циклона поле скорости существенно неоднородно и характеризуется наличием водоворотных областей (рис. 3). Чтобы исключить образование водоворотных областей, для упорядочивания потока в циклоне было предложено провести также исследования конструкции циклона с устройством входной части в форме «направляющей крышки» (рис. 4) [11].

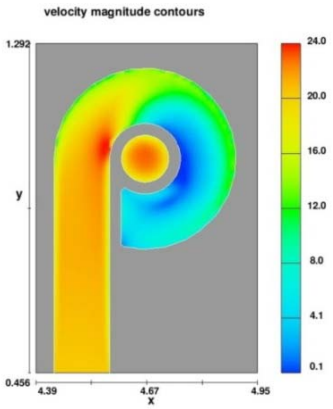


Рисунок 3. Образование водоворотных областей во входной части циклона (выделены синим цветом)

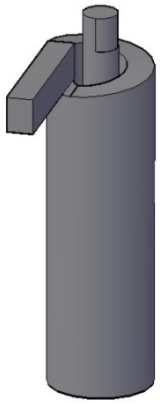


Рисунок 4. Схема циклона с подсоединением входного с «направляющей крышкой»

Численное моделирование было проведено для следующих геометрических параметров циклона (табл. 1) .

Таблица 1. Расчет потока в циклоне

№ изм	$\frac{r_0}{R}$	$\frac{b}{h}$	$\frac{H_{вх}}{d_0}$	Подсоединение входного патрубка	$\frac{a}{d_0}$	$\frac{H}{H_0}$	Коническая часть
1	0,3	>1	1,6	под углом 90°	1	1	-
2	0,4	1	1,6	под углом 90°	1	1	-
3	0,5	<1	1,6	под углом 90°	1	1	-
4	0,4	1	0	«направляющая крышка»	1	1	-
5	0,4	1	1,6	под углом 90°	3	1	-
6	0,4	1	1,6	под углом 90°	1	1	+
7	0,4	1	1,6	под углом 90°	1	2	-

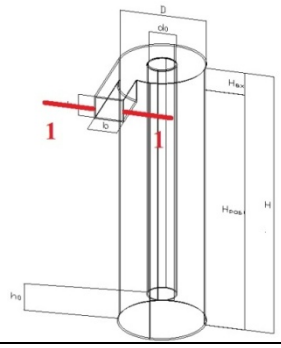
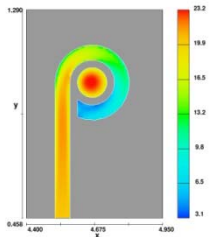
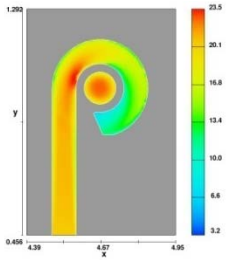
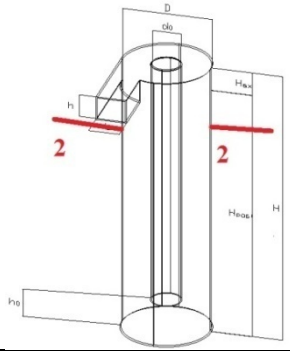
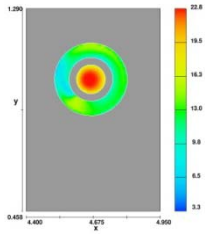
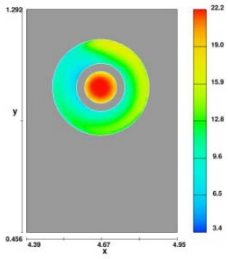
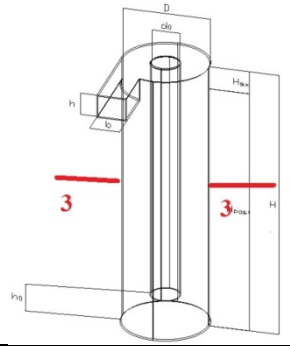
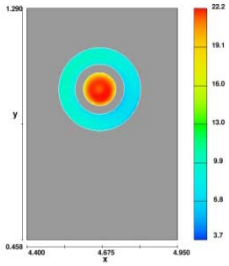
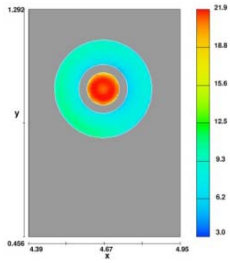
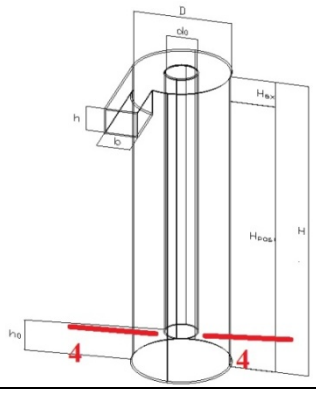
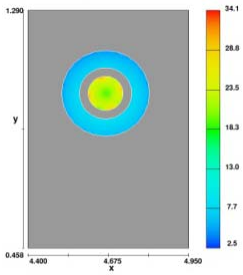
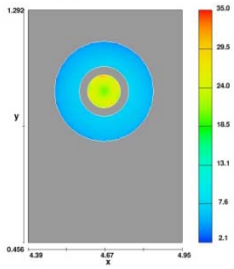
Результаты экспериментальных исследований показали следующее.

1. Высота $H_{вх}$ входного участка циклона (рис. 2), где происходит деформация потока от параллельноструйного на входе в циклон из подводящего прямоугольного воздуховода до расчетного осесимметричного потока в рабочей (расчетной) части, составляет $H_{вх} = 3{,}2r_0$.
2. Осредненная тангенциальная скорость u_ε в рабочей части циклона практически не зависит от r , т.е. использование модели свободного вихря для ее описания непригодно (табл. 2).
3. Среднее по радиусу значение тангенциальной скорости v_ε убывает по мере удаления от входа, от значений $v_\varepsilon = 0{,}6v_0$ в начале рабочей части циклона до $v_\varepsilon = 0{,}25v_0$ в конце (табл. 2).
4. Значения пульсационной скорости составляют 7-10% от осредненной тангенциальной скорости u_ε , что соответствует интенсивности турбулентности в продольно-однородных потоках в трубах. Устойчивая зависимость этих значений от радиальной координаты r не обнаружено (табл. 2).
5. Гидравлические потери напора от входа в циклон до выхода через отводящий патрубок пропорциональны квадрату расхода.
6. Устройство направляющей крышки уменьшает длину входной части циклона (рис. 2), но эффективность пылеудаления существенно не повышается, так как расширение потока в осевом направлении при наличии крышки не исключается (табл. 2).

Наиболее важным представляется результат №3, согласно которому тангенциальный поток воздуха, попадая в циклон, расширяется в осевом направлении. В результате этого средняя тангенциальная скорость v_ε уменьшается вдоль оси z . Таким образом, общепринятая в настоящее время гипотеза о продольной (вдоль оси x) однородности потока не подтверждается численным моделированием. Следовательно,

значения эффективности пылеудаления, рассчитанные на основании этой гипотезы, существенно завышены. Это связано с тем, что, хотя расстояния тангенциального переноса частиц пыли уменьшаются пропорционально v_ε (и частицы имеют больше возможностей выпасть на стенку циклона за счет этого фактора), центробежная гидравлическая крупность согласно формуле (4) уменьшается пропорционально квадрату v_ε, что приводит к тому, что значительная часть пыли не достигнет стенки циклона.

Таблица 2. Поле осредненной тангенциальной скорости по высоте циклона, значения средней тангенциальной скорости по высоте циклона

		Подсоединение входного патрубка и крышки: под углом 90^0	**Подсоединение входного патрубка и крышки: «направляющая крышка»**
№ сечения по высоте циклона		u_ε $v_{\varepsilon 0} = 20 м/с$	u_ε $v_{\varepsilon 0} = 20 м/с$
1		 $v_{\varepsilon 1} = 13{,}2 м/с$	 $v_{\varepsilon 4} = 18 м/с$
2		 $v_{\varepsilon 2} = 13 м/с$	 $v_{\varepsilon 4} = 14 м/с$
3		 $v_{\varepsilon 3} = 8 м/с$	 $v_{\varepsilon 4} = 7{,}8 м/с$
4		 $v_{\varepsilon 4} = 4 м/с$	 $v_{\varepsilon 4} = 4 м/с$

Проведенные исследования поля скорости показали, что для циклонов существующих конструкций используемое «расщепление» и независимый расчет движения частиц может привести к завышенным значениям эффективности пылеудаления в циклоне.

Имея это в виду, для расчета эффективности, в особенности для мелких частиц, рекомендуется, если есть такая возможность, выполнить с помощью численного моделирования с использованием универсальных пакетов программ, не только расчет полей скорости движения воздуха внутри циклона, но и движения и осаждения самих частиц пыли.

Следует отметить, что для таких расчетов необходимо задавать значения гравитационной гидравлической крупности частиц w. Значения этой величины обычно рассчитываются для отдельно движущихся частиц [12,13]. Однако даже при незначительных концентрациях частиц гидравлическая крупность является функцией не только плотности и размеров частиц, но и их концентрации.

Наиболее важным средством повышения эффективности циклона, особенно при улавливании мелких частиц, является уменьшение расширения потока газа в осевом направлении при его вращательном движении в циклоне. Это может быть достигнуто путем изменения конструкции циклона. Одним из возможных путей решения является уменьшение радиуса циклона и придание входному патрубку прямоугольной формы, вытянутой вдоль оси циклона. Исследованию подобных конструкций посвящен ряд работ, в которых приведены результаты опытного исследования, однако отсутствует обоснование эффективности подобных изменений конструкции циклона [14].

Для усовершенствования конструкций циклонов необходимо, во-первых, математическое моделирование осаждения частиц в трехмерном закрученном турбулентном потоке газа, во-вторых, проверка работы конструкции в производственных условиях.

Литература

1. Hoffmann A. C., Stein L. E. Gas Cyclones and Swirl Tubes. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verl., 2002. 421 p.
2. Штокман Е. А., Шилов В. А., Новгорадский Е. Е., Саввиди И. И., Скорик Т. А., Пашков В. В. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха. М. : Изд-во Ассоциации строительных высших учебных заведений, 2001. 688 с.
3. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с.
4. Стрелец К. И. Оценка эффективности осаждения частиц в циклонах пылеудаления в циклоне // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 4. С. 138-143.
5. Шиляев М. И., Дорохов А. П. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования : учеб. пособие. Томск : Изд-во ТГАСУ, 1999. 209 с.
6. Шиляев М. И., Шиляев А. М., Грищенко Е. П. Методы расчета пылеуловителей : учеб. пособие для студ. вузов. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2006. 384 с.
7. Syeda Noori Banu P., Syeda Arshi Banu P.. Simulation and empirical modeling of a Design of Cyclonic separator to combat air pollution // International Journal of Engineering Science and Technology. 2011. Vol. 3. No. 6. Pp. 4857-4878.
8. Zhongchao Tan. Mechanism of particle separation in aerodynamic air cleaning : PhD. Illinois : Urbana, 2004. 14 p.
9. Стрелец К. И. О характеристиках пыли, используемых при расчете эффективности пылеудаления в циклоне // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 110. С. 222-226.
10. Гиргидов А. Д. Турбулентная диффузия с конечной скоростью / СПбГТУ. СПб. , 1996. 259 с.
11. Штокман Е. А. Очистка воздуха. М. : АСВ, 1998. 320 с.
12. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды / пер. с англ. В.А. Хохрякова и Л.К. Эрдмана. М. : Мир, 1980. 549 с.
13. Титьенс О. Гидро- и аэромеханика. В 2 т. / по лекциям профессора Л.Прандтль, пер. с нем. Г.А. Вольперта. М. : Государственное технико-теоретическое издательство, 1932. 222 с.
14. Rus F., Ciulică L. G. Marinuc mirela experimental research regarding the influence of inlet geometry and air stream characteristics over separation efficiency // Journal of Engineering Studies and Research. 2011. Vol. 17. No. 2. Pp. 83-85.

**Ксения Игоревна Стрелец, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)552-94-60; эл. почта: kstrelets@mail.ru

Исследование и расчет вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой

Соискатель Е.И. Давыдов*;
д.т.н., профессор Б.Ф. Лямаев,
Военный инженерно-технический институт (филиал)
ФГВОУ ВПО «Военная академия тыла и транспорта им. генерала армии Хрулева А.В.»

Ключевые слова: отстойник со спирально-навитой насадкой; математическая модель; методика расчета; эффект осветления; коэффициент скорости осаждения частиц

При очистке сточных вод отстаивание является одним из основных методов выделения из очищаемой воды взвешенных веществ, а к наиболее распространенному методу водоподготовки относится осветление, которое осуществляется путем отстаивания воды в отстойниках.

В практике водоподготовки природных и очистки сточных вод получили распространение вертикальные отстойники. Преимущество этих отстойников в простоте устройства и эксплуатации. Недостатком их является большая глубина, что значительно удорожает стоимость их строительства, и низкий эффект осветления. Обычно он не превышает 30%, в то время как в горизонтальных и радиальных отстойниках эффективность очистки достигает 50-60% [1,2]. В связи с этим особую значимость приобретают задачи интенсификации работы сооружений для отстаивания воды и сокращения занимаемых ими площадей. Поэтому научные исследования были направлены на разработку новой конструкции вертикального отстойника и методики его расчета.

Создана конструкция и устройство вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой, новизна которого подтверждена патентом [3].

Данный отстойник представляет собой резервуар с днищем в виде усеченного конуса и спирально-навитой насадкой, вставленной в этот резервуар. На рис. 1 представлена схема вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой. Он состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1 и конусного днища 2. В центре отстойника размещена центральная труба 3, в нижней части которой установлена заглушка 7. В центральной трубе по всей высоте выполнено щелевое отверстие 4, к которому жестко прикреплена спирально-навитая насадка 6. Она начинается у центральной трубы и заканчивается у стенки цилиндрического корпуса. Спирально-навитая насадка образует канал, по которому движется очищаемая вода. Высота спирально-навитой насадки равна высоте цилиндрической части отстойника, а ширина канала, образованного стенками спирально-навитой насадки, одинакова по всей длине. В верхней части на цилиндрическом корпусе 1 установлен трубопровод 5 для отвода очищенной воды, а в нижней конусной части отстойника – трубопровод 8 для выпуска осадка.

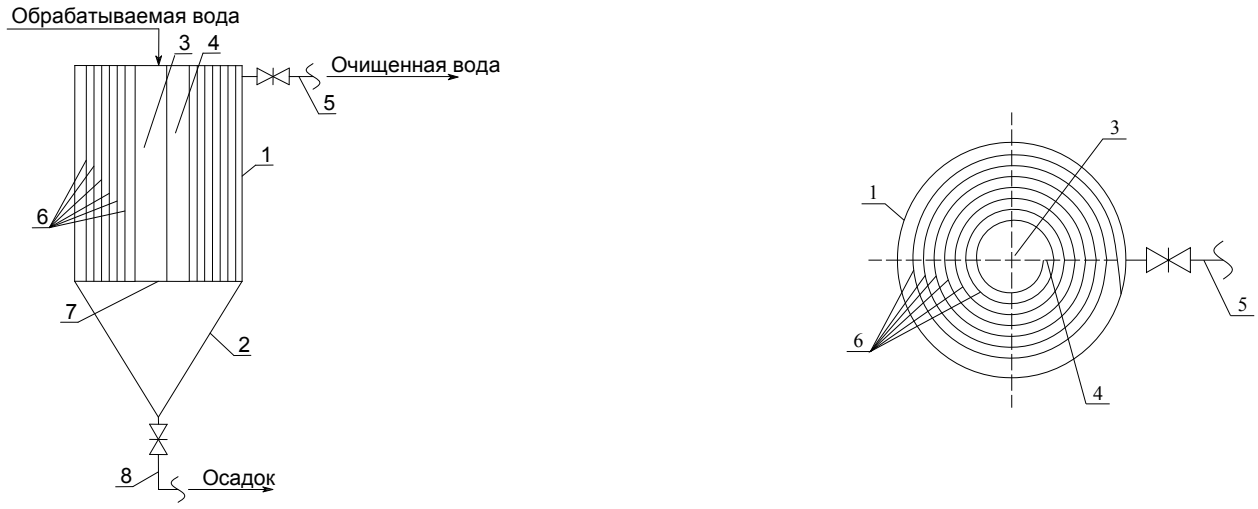


Рисунок 1. Схема вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой:
1 – вертикальный цилиндрический корпус; 2 – конусное днище; 3 – центральная труба; 4 – щелевое отверстие; 5 – трубопровод очищенной воды; 6 – спирально-навитая насадка; 7 – заглушка; 8 – трубопровод для удаления осадка

Очищаемая вода подается по центральной трубе, проходит через щелевое отверстие и далее поступает в канал спирально-навитой насадки. Канал спирально-навитой насадки служит для увеличения пути движения очищаемой воды, а, следовательно, увеличения продолжительности пребывания (времени отстаивания) обрабатываемой жидкости в отстойнике. Насадка также служит для увеличения площади соприкосновения очищаемой жидкости с ее стенкой. Необходимо отметить, что в данном отстойнике, как и в других типах отстойников, основной движущей силой процесса осветления является сила тяжести, действующая на частицы взвеси, под действием которой происходит их осаждение. Взвесь, выпавшая на стенке насадки либо в канале, поступает в нижнюю часть отстойника, образуя осадок, который периодически удаляется из отстойника. Очищенная вода отводится из отстойника.

Известные к настоящему времени модели процессов отстаивания [4-11] не позволяют для широкого интервала изменения параметров этих процессов рассчитывать эффект осветления по известным конструктивным характеристикам отстойников или решать обратную задачу. Указанные модели базируются на теории подобия и дают возможность воспроизводить в натурных отстойниках полученный в лаборатории эффект осветления.

Поэтому нами проведены теоретические исследования по разработке зависимостей, которые связывают конструктивные и технологические параметры отстойников. Предлагается математическая модель, позволяющая с единых методологических представлений описывать как процессы осаждения взвеси в цилиндре (покое), так и в сооружениях для очистки воды отстаиванием.

Рассмотрим процесс осаждения взвеси в некотором резервуаре (отстойнике), имеющем объём W, высоту H и площадь F. Резервуар заполнен жидкостью с концентрацией взвешенных веществ C.

Из коллоидной химии известна зависимость:

$$m = \frac{M}{H} U\tau \,. \tag{1}$$

В представленной зависимости (1) отношение $\frac{M}{H}$ представляет собой удельную массу примесей, приходящихся на единицу высоты резервуара, а произведение $U\tau$ – длину столба, из которого произошло осаждение примесей за время τ.

Если теперь в зависимости (1) заменить массу примесей в резервуаре выражением:

$$M = W\left(C - C_{пр}\right), \tag{2}$$

где $C_{пр}$ – концентрация неоседающих примесей (предельная концентрация примесей), то после подстановки (2) в выражение (1) получим основное уравнение седиментации:

$$m = UF(C - C_{пр})\tau \,. \tag{3}$$

Уравнение (1) и модификация (3) этого уравнения отражают процесс седиментации в монодисперсной системе. Полагаем, что оно применимо и для полидисперсной системы при условии, что промежуток времени, для которого подсчитывается масса выпавших примесей, бесконечно мал:

$$dm = UF(C - C_{пр})d\tau \,. \tag{4}$$

Для массы выпавших примесей за время $d\tau$, равной изменению массы примесей в объёме жидкости, является справедливым выражение, в котором объём воды в резервуаре считается постоянной величиной:

$$dm = -WdC \,. \tag{5}$$

Это справедливо в том случае, если пренебречь объёмом образующегося осадка по сравнению с объёмом обрабатываемой воды. По нашему мнению, такое допущение применимо для процессов очистки природных и для большинства сточных вод. Так, например, для городских сточных вод общий объем осадка не превышает 1% от общего объёма обрабатываемых стоков.

Из решения системы дифференциальных уравнений (4) и (5) при начальных условиях τ=0; $C=C_0$ предоставляется возможность получить зависимость времени отстаивания от средней концентрации взвеси в резервуаре:

$$\tau = \frac{H}{U} \ln \frac{C_o - C_{пр}}{C - C_{пр}} \,. \tag{6}$$

Анализ результатов экспериментов, выполненных другими исследователями [12], позволили выявить зависимость гидравлической крупности U от начальной концентрации примесей C_O. Учитывая, что величина U численно отличается от тех значений, которые определяются по традиционным методикам, в дальнейшем её будем называть коэффициентом скорости осаждения U_c.

Значения этого коэффициента изменяются в зависимости от времени отстаивания, но практически остаётся постоянным на интервале от 0 до времени, соответствующего эффекту осветления $Э$, равным 50%. Эффект осветления определяется по формуле:

$$Э = \frac{C_o - C}{C_o}. \tag{7}$$

Величина $C_{пр}$ для городских сточных вод составляет 10-15 мг/л.

Результаты исследований кинетики осаждения принято представлять в виде зависимости эффекта осветления $Э$ от времени отстаивания τ согласно СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения». С учётом этого выражение (6) может быть преобразовано к виду:

$$Э = \left(1 - e^{-\frac{U\tau}{H}}\right) \cdot \left(1 - \frac{C_{пр}}{C_o}\right), \tag{8}$$

где C_0 – начальная концентрация примесей в очищаемой воде.

На основании вышеизложенных исследований разработана математическая модель, которая описывает процесс осаждения взвеси в отстойнике со спирально-навитой насадкой. Рассмотрим канал спирально-навитой насадки отстойника (рис. 2).

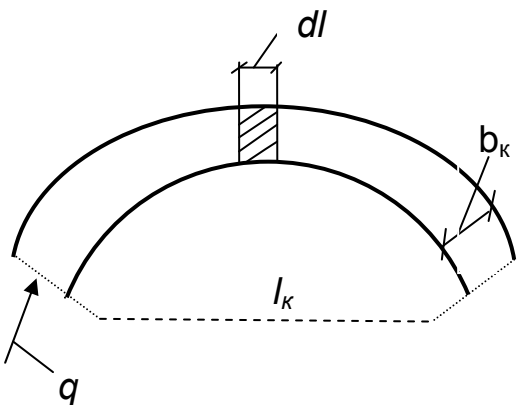


Рисунок 2. Канал спирально-навитой насадки отстойника

На произвольно выбранном участке по длине канала $l_к$ выделим элементарный участок dl. Запишем уравнение для изменения массового расхода взвеси, в элементарном участке:

$$dG = Ub_к(C - C_{пр})dl, \tag{9}$$

где G – массовый расход взвеси; U – коэффициент скорости осаждения (гидравлическая крупность частиц); $b_к$ – ширина канала спирально-навитой насадки отстойника; C – концентрация взвеси в элементарном объёме; $C_{пр}$ – предельная концентрация взвеси (концентрация не оседающих примесей).

Одновременно с уравнением (9) для изменения массового расхода взвеси, поступающей с обрабатываемой водой, является справедливым выражение:

$$dG = -qdC, \tag{10}$$

где q – расход обрабатываемой воды.

Зависимости (9) и (10) дают возможность получить дифференциальное уравнение, описывающее процесс осаждения взвеси в данном отстойнике:

$$-qdC = Ub_к(C - C_{пр})dl. \tag{11}$$

Решение уравнения (11) при граничных условиях $l = 0, C = C_{пр}$ позволяет получить зависимость для определения концентрации взвеси на выходе из отстойника (в очищенной воде):

$$C = C_{пр} + (C_o - C_{пр}) \cdot e^{-\frac{U \cdot b_к \cdot l_к}{q}}. \tag{12}$$

Если выразить скорость движения V очищаемой воды в канале спирально-навитой насадки формулой:

$$V = \frac{q}{b_к \cdot H_к}, \tag{13}$$

где $H_к$ – высота канала спирально-навитой насадки, то получим:

$$C = C_{пр} + (C_o - C_{пр})e^{-\frac{U \cdot l_к}{H_к \cdot V}}. \tag{14}$$

Как было отмечено, результаты исследований кинетики осаждения принято представлять в виде зависимости эффекта осветления $Э$ от изменения концентрации. Эффект осветления определяется по формуле (7).

С учетом этого формулы (12) и (14) преобразуем к виду:

$$Э = Э_{пр}\left(1 - e^{-\frac{U \cdot l_к \cdot b_к}{q}}\right) \tag{15}$$

$$\text{или } Э = Э_{пр}\left(1 - e^{-\frac{U \cdot l_к}{H \cdot V}}\right), \tag{16}$$

где $Э_{пр}$ – предельный эффект осветления – определяется по формуле:

$$Э_{пр} = \frac{C_o - C_{пр}}{C_o}. \tag{17}$$

При выводе соотношений (12), (14), (15) и (16) никаких ограничений на условие осаждения взвеси не накладываются.

Таким образом, полученная зависимость (16) используется для расчета отстойника со спирально-навитой насадкой, в которой:

$Э$ – требуемый эффект осветления, доли единиц;

U – коэффициент скорости осаждения (гидравлическая крупность) взвешенных веществ, м/с, задерживаемых в отстойнике;

$l_к$ – длина канала спирально-навитой насадки, м;

H – высота цилиндрической части отстойника со спирально-навитой насадкой, м;

V – скорость движения очищаемой воды в канале спирально-навитой насадки отстойника, принимаем согласно СНиП 2.04.03-85 как для горизонтального отстойника $(5-10)\cdot 10^{-3}\, м/с$;

$Э_{пр}$ – предельный эффект осветления, доли единиц.

В зависимости (16) коэффициент скорости осаждения (гидравлическая крупность) взвешенных веществ $U, мм/с$, определяется по формуле:

$$U = \frac{1000 \cdot H}{t_{set}\left(\frac{H}{h_1}\right)^{n_2}}, \tag{18}$$

где H – высота цилиндрической части отстойника, в которую вставлена спирально-навитая насадка, м, принимаемая на основе возможных глубин типовых вертикальных отстойников H =2,7-3,8 м;

t_{set} – продолжительность отстаивания, сек., соответствующая заданному эффекту осветления и полученная в лабораторном цилиндре в слое h_1, определяется по таблице 30 СНиП 2.04.03-85;

h_1 – глубина воды при отстаивании в покое (высота слоя воды в лабораторном цилиндре), принимаемая равной 0,5 м;

n_2 – показатель степени, зависящий от способности взвешенных веществ к агломерации, принимаемый по черт. 2 СНиП 2.04.03-85.

Далее из формулы (16) определяется длина канала $l_к, м,$ спирально-навитой насадки, которая должна обеспечивать требуемый эффект осветления очищаемой воды в отстойнике:

$$l_k = -\frac{\ln\left(1 - \frac{Э}{Э_{пр}}\right) \cdot H \cdot V}{U}. \quad (19)$$

Необходимая площадь живого сечения F, м^2, цилиндрической части определяется по выражению:

$$F = \frac{\pi\left(D_{от}^2 - d_{ц.т.}^2\right)}{4}, \quad (20)$$

где $D_{от}$ – диаметр отстойника со спирально-навитой насадкой, м;

$d_{ц.т}$ – диаметр центральной трубы, м, к которой прикреплена спирально-навитая насадка.

Следует заметить, что площадь живого сечения F, м^2, цилиндрической части отстойника со спирально-навитой насадкой есть произведение длины канала на ширину канала насадки:

$$F = b_к \cdot l_к, \quad (21)$$

где $b_к$ – ширина канала спирально-навитой насадки отстойника, принимается конструктивно.

Подставив зависимость (21) в (20), можно определить диаметр отстойника со спирально-навитой насадкой $D_{от}, м.$:

$$D_{от} = \sqrt{\frac{4 \cdot l_к b_к}{\pi} + d_{ц.т}^2}. \quad (22)$$

Диаметр центральной трубы $d_{ц.т}, м,$ определяется по формуле:

$$d_{ц.т} = \sqrt{\frac{q_{set}}{2{,}82 \cdot \upsilon_{ц.т}}}, \quad (23)$$

где q_{set} – расчетный максимальный часовой расход сточных вод, м^3/ч;

$\upsilon_{ц.т}$ – скорость движения воды в центральной трубе, принимаем 30 мм/с, согласно СНиП 2.04.03-85.

Количество витков спирально-навитой насадки n определяется по формуле:

$$n = \frac{D_{от} - d_{ц.т}}{2 \cdot b_k}. \quad (24)$$

Высота конусной части отстойника $H_к, м,$ при угле наклона ее стен к горизонту 50° определяется по формуле:

$$H_к = \frac{D_{от}}{2} \cdot tg50^0. \quad (25)$$

Объем цилиндрической части $W_{цил}, м^3,$ отстойника определяется по формуле:

$$W_{цил} = \frac{\pi \cdot D_{от}^2}{4} H_{цил}. \quad (26)$$

Объем конусной части $W_к, м^3,$ отстойника определяется по формуле:

$$W_к = \frac{\pi \cdot D_{от}^2}{12} H_к. \quad (27)$$

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Спирально-навитая насадка существенно влияет на увеличение эффекта осветления по сравнению с обычным вертикальным отстойником. При проектировании отстойников на одинаковый эффект очистки конструктивные размеры отстойника со спирально навитой насадкой значительно меньше, что снижает капитальные затраты на строительство.
2. Получены математические зависимости, которые позволяют, определять конструктивные параметры отстойника на заданную эффективность осветления очищаемой воды.
3. Разработана математическая модель, описывающая технологический процесс отстаивания в вертикальном отстойнике со спирально-навитой насадкой. Предложена методика инженерного расчета данного сооружения.

Литература

1. Федоров Н. Ф., Шифрин С. М. Канализация. М. : Высшая школа, 1968. 592 с.
2. Яковлев С. В., Калицун В. И. Механическая очистка сточных вод. М.: Стройиздат, 1972. 200 с.
3. Болдырев В. В., Давыдов Е. И. Отстойный резервуар / Патент RU №2182508, МПК B01D21/02.
4. Иткин А. Л. К вопросу технологического моделирования процесса осветления сточных вод // В кн.: Исследования по очистке сточных вод. Сборник трудов № 66 Московского инженерно-строительного института им В.В. Куйбышева. М. : 1970. С. 92-99.
5. Ватин Н. И., Чечевичкин В. Н., Чечевичкин А. В., Шилова Е. С. Очистка сточных вод узлов мойки бетоносмесительного и бетонотранспортного оборудования // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2(20). С. 16-23.
6. Чечевичкин А. В., Чечевичкин В. Н., Ватин Н. И. Особенности очистки воды из р. Вуокса в летний период // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 2. С. 23-26.
7. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с.
8. Таварткиладзе И. М., Кравчук А. М., Нечипор О. М. Математическая модель расчета вертикальных отстойников с перегородкой // ВСТ: Водоснабжение и санитарная техника. 2006. №1, ч.2. С. 39-42.
9. Кореньков А. Д. Динамическая модель процессов осаждения – уплотнения осадка в отстойниках // Экология и промышленность России. 2010. №10. С. 36-39.
10. Bemessungsregeln für Nachklärbecken/Köster Stephan // WWT: Wasserwirt. Wassertechn.: Das Praxismagazin für Entscheidungen im Wassermanagement. 2005. № 1-2. С. 22-24. (нем.)
11. Wang Ren, Yu Qing-jiang, Che Ji-fang // China Water and Wastewater. 2004. 20, № 9. С. 96-97. (англ.)
12. Иванов В. Г., Семёнов В. П., Симонов Ю. М. Применение тонкослойных отстойников целлюлозно-бумажной промышленности. М. : Лесная промышленность, 1983. 176 с.

**Евгений Иванович Давыдов, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.:+7(921)9226284; эл.почта: davydov.1967@mail.ru

Разработка и технико-экономическое сопоставление вариантов проектных решений по предотвращению поступления поверхностных и грунтовых вод на территорию Металлургического терминала порта Усть-Луга

Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Н.В. Арефьев*;
к.т.н., доцент Ю.В. Волкова;
к.т.н., доцент С.Я. Павлов;
магистрант В.А. Олешко,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: мелиорация; водоотведение; открытый канал; щебёночная дрена; площадь водосбора

Металлургический терминал является важной составляющей комплекса порта Усть-Луга, расположенного на восточном берегу Финского залива в районе Югантовского мыса (рис. 1). Металлургический терминал является важным народохозяйственным объектом, поэтому проблема защиты его от затопления поверхностными и грунтовыми водами представляется весьма актуальной. Следует отметить реальность такого затопления, так как территория порта находится у подножия береговой террасы высотой 27-30 метров.

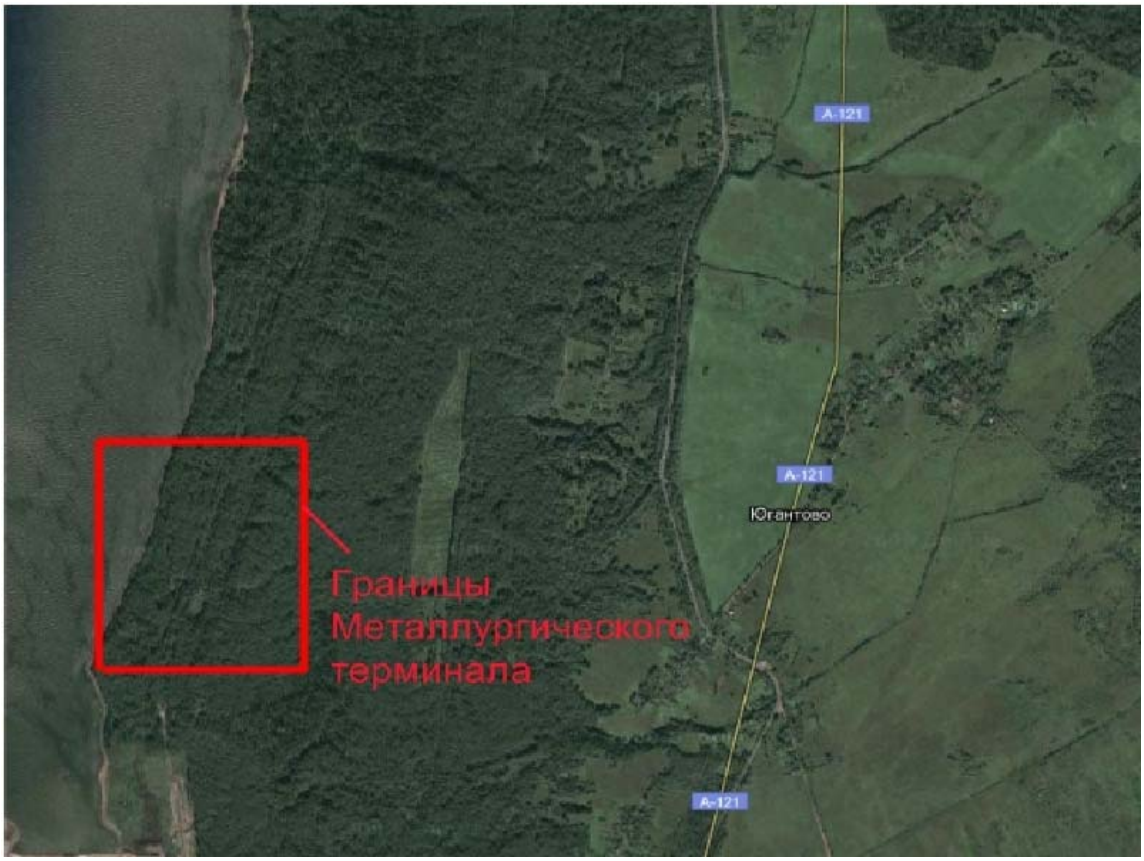


Рисунок 1. Участок строительства Металлургического терминала в порту Усть-Луга

1. Основные исходные данные

В качестве основного материала в распоряжении Авторов были результаты обследования участка Металлургического терминала, проведённого специализированными организациями в 2007-2011-х годах. Главными из этих материалов являлись следующие.

1.1. Данные по топографии

1. План части участка Металлургического терминала порта Усть-Луга, выполненный ООО «Петрослав гидросервис» в масштабе 1:500 в 2009 году. Горизонтали плана проведены через 0.5 метра.

Достоинством плана является то, что на нём показан единственный стационарный объект территории, к которому возможна привязка всех остальных объектов – маяк, окружённый оградой (рис. 2).

2. Схема первоочередных сооружений системы отведения стока поверхностных водотоков от территории северного района Морского торгового порта Усть-Луга, масштаб 1:50000, горизонтали проведены через 1 метр.

Рисунок 2. Маяк, окружённый оградой

Схема свидетельствует, что естественная надводная территория Металлургического терминала представляет собой довольно плоскую площадку с преобладающими отметками 2-3 метра. К востоку от территории терминала располагается крутой уступ, ограничивающий террасу с отметками 27-30 метров. Схема предоставлена только в электронном виде.

3. Предварительная схема Генерального плана терминала металлогрузов в порту Усть-Луга, М 1:2000 (дано расположение основных объектов терминала, его границы и топография в пределах терминала).

4. Трасса водосбросного сооружения вдоль южной границы терминала; схема трассы представляет собой фрагмент компоновочной схемы генерального плана Морского торгового порта Усть-Луга

5. «БМТ ГП схема ж/д подходов от ЛГТ 03.06.10» (на схеме даны координаты некоторых точек перелома границы территории терминала).

1.2. Данные по естественным водотокам

Основным источником сведений о водотоках, протекающих по территории порта, является отчёт ООО «УНИКОМ». По данным этого отчёта можно судить о гидрографической сети на данной территории (рис. 3).

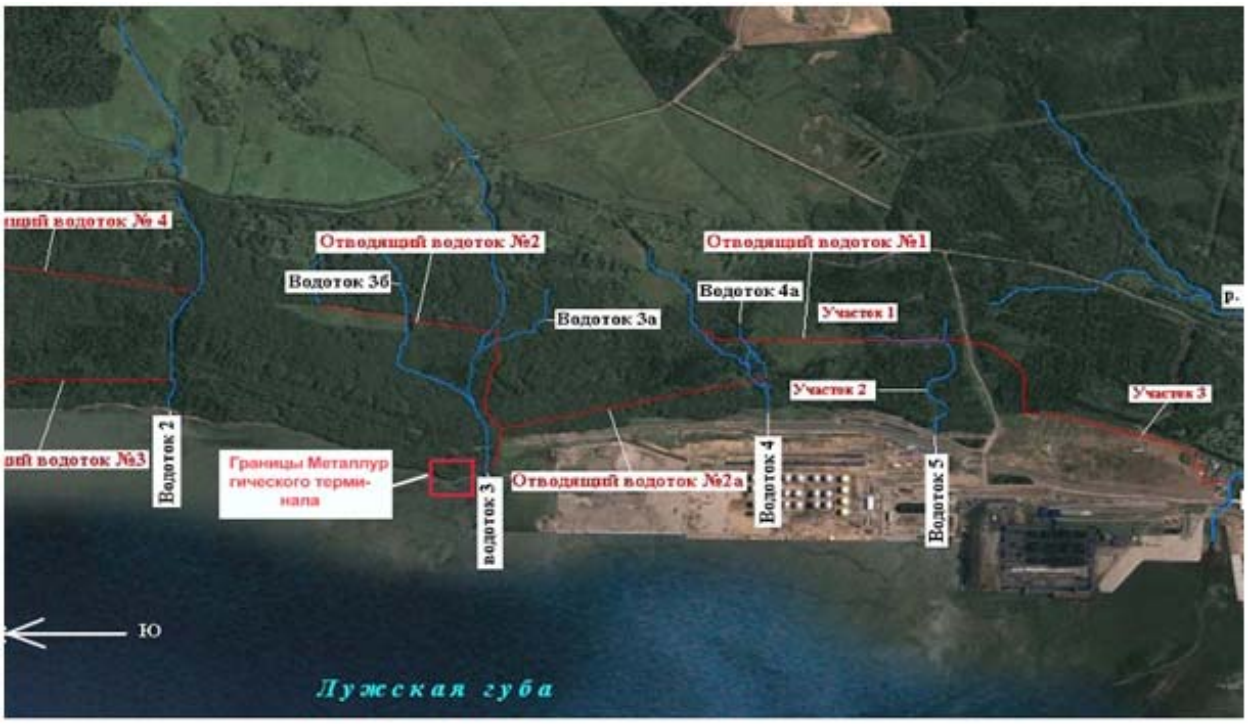


Рисунок 3. Гидрографическая сеть в соответствии с отчётом ООО «УНИКОМ»

1.3. Искусственные водные объекты

К искусственным водным объектам рассматриваемой территории относятся каналы, перехватывающие сток естественных водотоков, и каналы, отводящие его в Лужскую губу. Схема расположения существующих и проектируемых водотоков приведена в отчёте ООО «УНИКОМ».

О конструкции каналов можно судить только по плану водоотводящего канала, проходящего по южной границе Металлургического терминала и являющегося продолжением водотока №3. Масштаб чертежа не указан, поэтому о плановых размерах объекта можно судить только ориентировочно.

1.4. Геологическое строение местности

Геологическое строение местности характеризуется данными по двум скважинам, располагающимся в непосредственной близости от Металлургического терминала. Эти данные свидетельствуют о том, что грунты, слагающие территорию Металлургического терминала (суглинки с прослойками песка и с растительными остатками, пылеватые пески), обладают весьма значительной водопроницаемостью и что приток грунтовых вод к терминалу будет значительным. Сведений о положении уровней грунтовых вод нет.

2. Дополнительные материалы

В качестве дополнительных материалов к работе был привлечён фрагмент карты местности, (рис. 4) и аэрофотосъёмка территории Металлургического терминала (рис. 1).

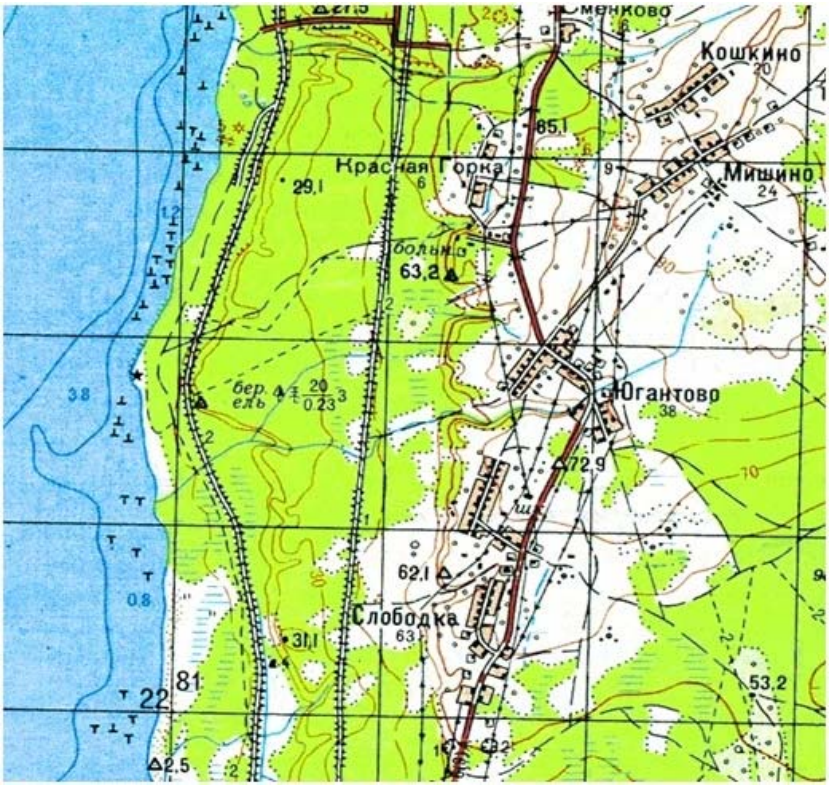


Рисунок 4. Фрагмент карты местности, на которой располагается Металлургический терминал

3. Работы, выполненные в ходе натурного обследования объекта

Для уточнения данных, представленных в отчёте ООО «УНИКОМ», было принято решение провести собственное натурное обследование территории, прилегающей к площадке строительства металлургического терминала. В ходе обследований, проводившихся 20.05.2010 и 29.06.2010, решались следующие задачи:

- уточнение местоположения объектов гидрографической сети и границ терминала, их привязка к маяку;
- обследование территории на юг и на север от участка Металлургического терминала;
- проверка данных о расходе в ручье №3.

Рисунок 5. Взаиморасположение водотока №3 и маяка

3.1. Определение действительного местоположения водотоков

В ходе натурного обследования территории было выявлено, что водоток №3 находится южнее маяка на 126 м (см. рис. 5).

В отчёте ООО «УНИКОМ» водоток №3 показан значительно севернее маяка (см. рис. 6).

Действительное месторасположение ручья указано на рис. 7.

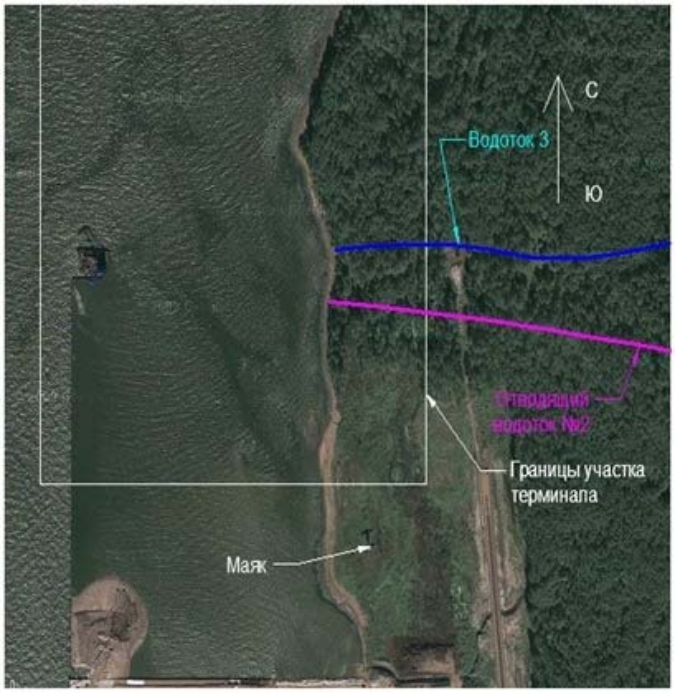


Рисунок 6. Местоположение водотока №3 в соответствии с отчётом ООО «УНИКОМ»

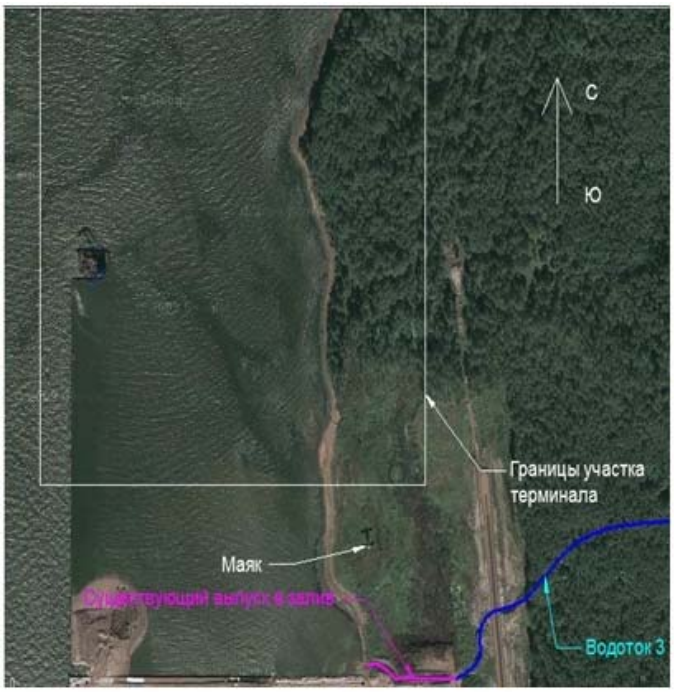


Рисунок 7. Действительное положение водотока №3

3.2. Обследование территории к северу от участка Металлургического терминала.

При обследовании территории к северу от участка Металлургического терминала между водотоками №2 и №3 был обнаружен водоток с расходом на момент наблюдения около 1 л/с, не указанный в отчёте ООО «УНИКОМ». Этот водоток условно назван «Водоток №3-2». Расположение водотока №2 по результатам натурного обследования практически точно совпадает с данными ООО «УНИКОМ».

3.3. Уточнение расхода водотока №3

Для измерения расхода воды в водотоке №3 был выбран створ на относительно прямолинейном участке, находящийся на 50 метров выше по течению от полотна железной дороги. Мёртвое пространство и зона зарастания в створе отсутствовали. Промеры поперечного сечения водотока в створе были проведены мерной рейкой. Измерения скоростей осуществлялись методом поверхностных поплавков, в соответствии с рекомендациями [3,4,5,6]. Результаты измерений и все расчёты фиксировались в Книге записи измерения расхода воды КГ-3. Полученное значение расхода совпадает с данными отчёта ООО «УНИКОМ» в пределах допустимой погрешности.

3.4. Возможный учёт результатов натурных исследований в дальнейших разработках

1. Наличие водотока 3-2 может оказаться важным при разработке мероприятий по предотвращению затопления территорий порта, расположенных к северу от Металлургического терминала.
2. В дальнейших разработках положение водотока №3 и, соответственно, отводящего водотока №2 переносятся к югу.
3. Расходы воды, рекомендованные в отчёте ООО «УНИКОМ», принимаются за истинные.

4. Варианты конструкций собирателя, защищающего территорию Металлургического терминала от поверхностных и грунтовых вод

В процессе выполнения работы были разработаны три варианта конструкции собирателя. Все три варианта рассчитывались на значение расхода грунтовых и поверхностных вод, поступающих к территории Металлургического терминал, принимаемого по формуле, рекомендуемой [7]:

$$Q = q \times F,$$

где q – модуль стока, л/с/га, представляющий собой расход, поступающий в собирателя с одного гектара площади водосбора;
F – площадь водосбора, га.

В соответствии с [7], модуль стока для суглинков с прослойками песка может быть принят равным q=0,6 л/с/га (данные для Ленинградской области).

Площадь водосбора определяется в соответствии с тем фактом, что отметки территории, окружающей Металлургический терминал, слабо изменяются к северу и к югу по отношению к участку строительства терминала. Исходя из этого принимается, что вода будет поступать в собиратель преимущественно с восточной части, где имеется значительный уклон дневной поверхности по направлению к терминалу. По классификации [8] имеет место склоновый и грунтово-напорный тип водного питания. С учётом этого, площадь водосбора принимается ограниченной проектируемым собирателем с запада и отрезком отводящего водотока №2 с востока, её значение составляет 0,53 км^2=53 га (рис. 8).

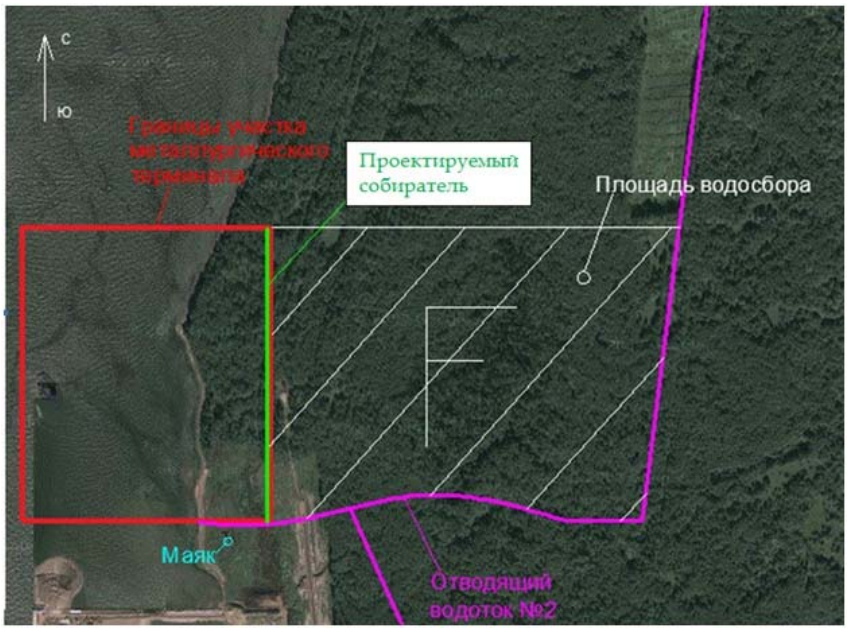


Рисунок 8. Схема к определению площади водосбора

Тогда расход Q, поступающий к собирателю, будет равен:

$$Q = qF = 0{,}6 \times 53 = 31{,}8 л/с = 0{,}032 м^3/с.$$

Для условий порта Усть-Луга наиболее подходящими представляются следующие типы защитных устройств (собирателей):

1) открытый канал;
2) дрена с перфорированной дренажной трубой;
3) щебёночная дрена.

Все собиратели рассчитывались на прохождение расчётного расхода Q=0,032м^3/с в условиях равномерного режима.

Норма осушения, т.е. расстояние от поверхности земли до уровня грунтовых вод (общепринятое обозначение *a*) на защищаемой территории терминала принимается в соответствии со СНиП 06.03-85 «Мелиоративные системы и сооружения» равной a=1м для всех трёх конструкций собирателя.

4.1. Определение основных параметров собирателя в виде открытого канала

Данное проектное решение предполагает устройство открытого канала трапецеидального сечения вдоль восточной границы участка Металлургического терминала.

Гидравлический расчёт открытого канала осуществлялся в соответствии с Приложением 16 СНиП 06.03-85.

Для гидравлического расчёта были приняты следующие значения параметров, определяющих конструкцию собирателя.

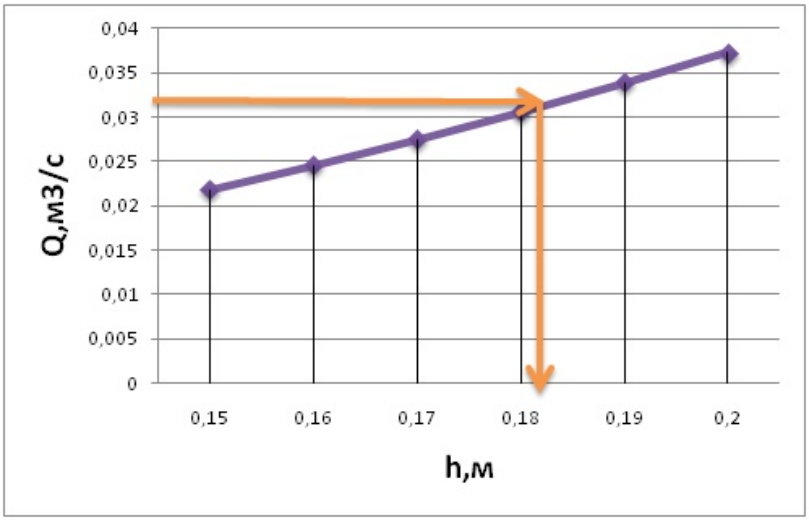


Рисунок 9. График зависимости f=Q(h)

1. Коэффициент заложения откосов m. Для суглинков с прослойками песка согласно табл. 6.1 [9], коэффициент заложения откосов m=1,5.
2. Коэффициент шероховатости n. Для повышения устойчивости откосов к размыву, а также для обеспечения поступления в собиратель грунтовых вод наиболее рациональным покрытием откосов представляется одерновка. Согласно [9] коэффициент шероховатости n для одернованных каналов принимается равным n=0,035.
3. Уклон дна i. Согласно рекомендациям [10] принят равным i=0,001.
4. Ширина канала по дну b. b=0,5м – минимальное значение по условиям производства работ.

Согласно алгоритму, рекомендуемому для расчетов мелиоративных каналов, по значениям глубин наполнения h, и соответствующим им расходам Q строится зависимость f=Q(h), по которой для расхода Q=31,8 л/с=0,032 м^3/с находится соответствующая глубина наполнения h=0,181м (рис. 9).

Поперечное сечение открытого канала представлено на рис.10 (поперечное сечение открытого канала).

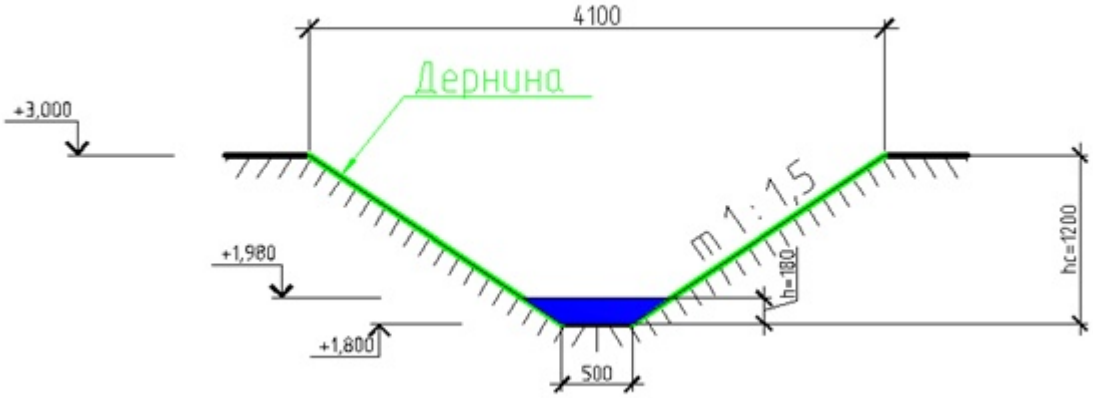


Рисунок 10. Поперечное сечение открытого канала

Наиболее дешёвым и рациональным способом выпуска воды из собирателя в канал-водоприёмник представляется устройство трубы-переезда (рис. 11). Это сооружение включает трубу, сопрягающую осушитель с каналом-водоприёмником (труба железобетонная, диаметр трубы принят конструктивно d=500мм); стальную диафрагму, удлиняющую путь контактной фильтрации и установленную примерно на середине трубы; входной железобетонный оголовок (может быть снабжён сороудерживающей решёткой); объёмный железобетонный выходной оголовок стандартной конструкции и крепление части канала-водоприёмника каменной наброской, предотвращающей размыв русла канала-водоприёмника потоком, поступающим из собирателя.

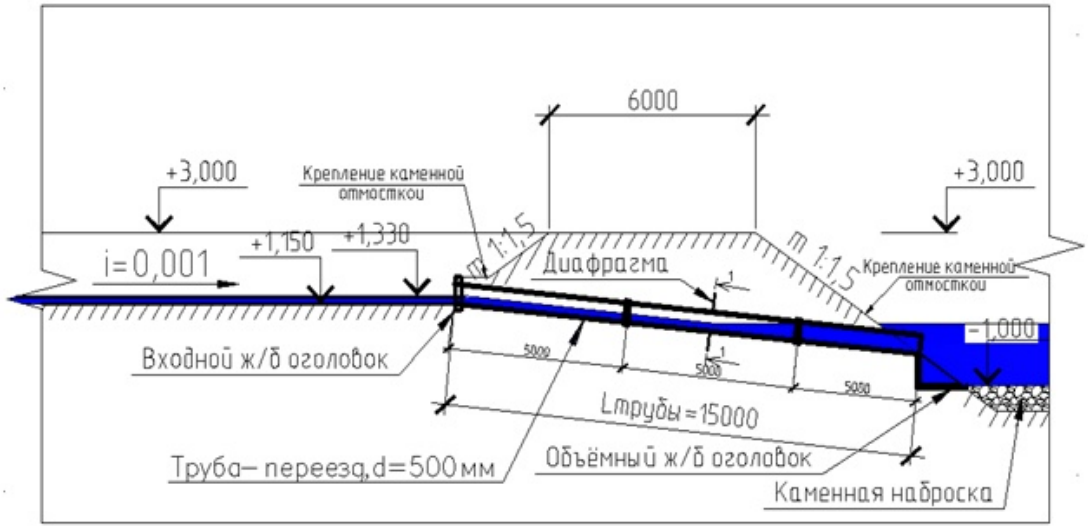


Рисунок 11. Конструктивная схема устройства трубы-переезда

С некоторыми изменениями эта схема пропуска воды из собирателя в канал-водоприёмник применена и в других типах собирателей.

4.2. Собиратель в виде дрены с перфорированной дренажной трубой

Данный тип собирателя представляет собой канал шириной по низу b=0,5м, заложением откосов m 1:0,5, заполненный щебнем с проложенной в нём перфорированной трубой. Уклон дна канала принимается равным i=0,001.

Канал засыпается щебнем полностью, до поверхности земли осушаемой территории, так как это позволяет перехватить не только дренажный, но и поверхностный сток. Низ трубы не должен находиться ниже глубины промерзания, принимаемой равной 1,2 м для Ленинградской области.

Откосы и дно канала покрываются геотекстилем, предотвращающим поступление в щебёночную призму мелких частиц грунта, слагающего осушаемую территорию.

Гидравлический расчёт трубы осуществляется для условия напорного движения (наиболее гидравлически невыгодный случай) с помощью методики, изложенной в [11].

Диаметр дренажной трубы принимается d=300 мм=0,3 м. Расход Q, пропускаемый этой трубой в напорном режиме при уклоне i=0,001, определяется по формуле:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} 0{,}5C\sqrt{di},$$

где C – коэффициент Шези, определяющийся по эмпирической формуле Куттера:

$$C = \frac{100}{1 + \frac{2k}{\sqrt{d}}}.$$

Здесь k – особый коэффициент шероховатости, принимаемый равным 0,27;
d – диаметр дренажной трубы, м.

Для принятых условий расход, который может пропустить труба, равен:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} 0{,}5C\sqrt{di} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}3^2}{4} 0{,}5 \cdot 50\sqrt{0{,}3 \cdot 0{,}001} = 0{,}031 м^3/с.$$

Этот расход меньше, чем тот, который поступает на осушаемую территорию в виде поверхностного и грунтового стока, равный Q= 0,032 м^3/с.

По сортаменту широко применяющихся перфорированных труб Перфокор-II наиболее близким к 300 мм диаметром серийно выпускающейся трубы является d=315мм. При таком диаметре труба будет пропускать расход Q=0,032 м^3/с, то есть тот расход, который поступает извне на территорию Металлургического терминала.

Поперечное сечение щебёночной дрены с перфорированной трубой представлено на рис. 12.

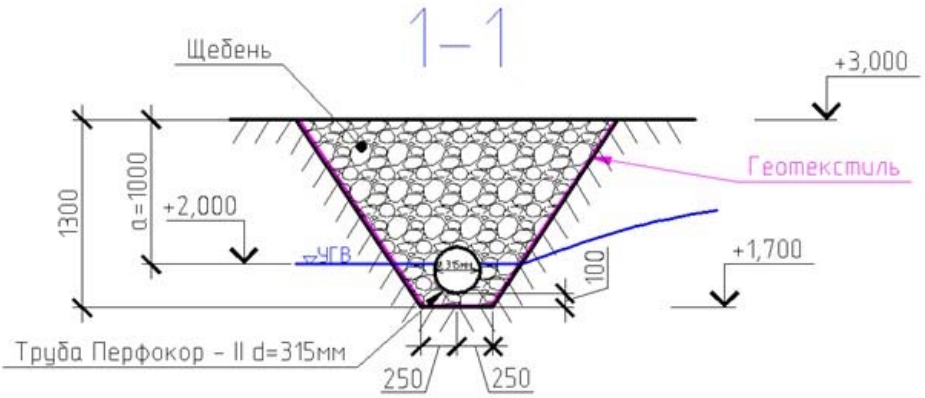


Рисунок 12. Поперечное сечение щебёночной дрены с перфорированной трубой

4.3. Собиратель в виде щебёночной дрены

Конструкция данного вида собирателя представляет собой траншею с максимально крутыми откосами, имеющую продольный уклон i=0,001, заполненную щебнем с диметром частиц 100 мм. Так же как и в предыдущем случае, щебёночная призма отделена от грунта, слагающего территорию терминала, геотекстилем.

Для определения необходимого размера траншеи находится скорость движения воды в собирателе. Расчёт ведётся по отрезкам собирателя при разделении водосборной площади на три участка. Принимая, что поступление воды с водосборной площади в собиратель подчиняется линейному закону, определяются следующие расходы на отрезках (нумерация отрезков идёт вниз по течению):

- Q_1=0.01м^3/с
- Q_2=0.02м^3/с
- Q_3=0.032м^3/с

Для определения скорости движения воды по собирателю, заполненному крупнозернистыми и скальными грунтами, используется зависимость Смрекера [12]:

$$\upsilon = kI^{1/m},$$

где k – коэффициент фильтрации грунта;
m – фильтрационная характеристика грунта (для каменной наброски принимается равной 2,0).

Коэффициент фильтрации для щебня с диметром частиц 100 мм принимается равным 0,23 м/сек. Тогда скорость движения воды по собирателю будет равна:

$$\upsilon = 0.23 \cdot 0.001^{1/2} = 0.007 м/с.$$

Исходя из этого значения скорости и вышеприведенных расходов на участках, определяется необходимая площадь поперечного сечения собирателя:

$$\omega = Q/\upsilon.$$

Отсюда площадь поперечного сечения по участкам будет равна:

- ω_1=0,01/0,007=1,4м^2
- ω_2=0,02/0,007=2,8м^2
- ω_3=0,032/0,007=4,6м^2

Исходя из необходимой площади живого сечения, допуская, что на каждом отрезке поток воды идёт через всю площадь поперечного сечения щебёночной призмы, расположенную ниже нормы осушения a=1м, принимаются следующие размеры поперечного сечения собирателя:

- отрезок 1: b= 2,00м; h = 1,70м;
- отрезок 2: b= 2,70м; h = 2,03м;
- отрезок 3: b= 3,40м; h = 2,35м.

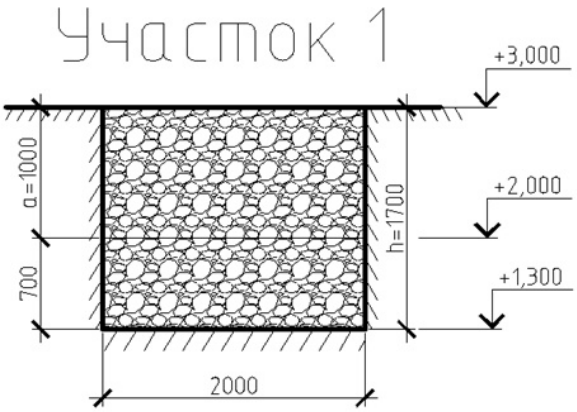


Рисунок 13. Поперечное сечение щебёночной призмы на отрезке 1

Поперечное сечение щебёночной призмы на участке 1 приведено на рис. 13.

5. Приблизительная технико-экономическая оценка вариантов собирателей

Ориентируясь на расценки на земляные работы, принятые в большинстве фирм, ведущих работы в Ленинградской области, осреднённые цены на строительные материалы (щебень, бетонные и перфорированные пластиковые трубы, камень для отмостки и т.д.) можно приблизительно оценить стоимости сооружения каждого типа собирателей.

- Открытый канал с одернованными откосами. 557 500 руб.
- Собиратель с установкой дренажной трубы. 1 583 850 руб.
- Собиратель в виде траншеи, засыпанной щебнем. 3 233 450 руб.

Выводы

1. Вариант собирателя в виде открытого канала представляется оптимальным с точки зрения низкой стоимости, высокой функциональности и простоты выполнения работ по сооружению. Недостатком является большая площадь, отчуждаемая от территории терминала (ок. 3300м^2), необходимость устраивать мосты для автомобильных и железных дорог и тщательно ухаживать за дерновым покрытием.
2. Вариант в виде закрытого собирателя с перфорированной дренажной трубой более дорогой по сравнению с открытым каналом, но его конструкция весьма надёжна и дёшева в эксплуатации, практически не представляет сложностей при пересечении с транспортными коммуникациями. Однако в местах этих пересечений перфорированную трубу следует помещать в ж/б или стальную трубу с большим диаметром для защиты от механических воздействий тяжёлого транспорта.
3. Вариант устройства щебёночной дрены самый дорогой. Однако его достоинством является практически полное отсутствие необходимости в дополнительных строительных конструкциях при пересечении с транспортными коммуникациями.

По мнению авторов, предпочтительным является вариант в виде закрытого собирателя с перфорированной дренажной трубой, засыпанной щебнем. Несмотря на относительно высокую стоимость, его надёжность, компактность, возможность прокладывать через него автомобильные и железные дороги делают его наиболее приемлемым для условий портового терминала.

Литература

1. Александров Л. Н. Гидрометрия для гидротехнических специальностей. Л. : издательство ЛПИ, 1980. 83 с.
2. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с.
3. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 2, ч. II: Гидрологические наблюдения на постах. Л. : Гидрометеоиздат, 1975. 264 с.
4. Herschy R. W. Hydrometry. Principles and Practices. Chichester : John Wiley and Sons, 1978. 376 p.
5. Guide to Hydrological Practices / World Meteorological Organization. Publication No. 16. Geneva, 1974. 730 p.
6. Kuusisto E. Hydrological measurements. [Электронный ресурс] Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/wqmchap12.pdf.
7. Гулюк Г. Г., Черняк М. Б., Штыков В. И., Янко Ю. Г. Руководство по мелиорации полей. СПб. : изд-во Политехн. ун-та, 2007. 238 с.
8. Маслов Б. С., Минаев А. В., Губер К. В. Справочник по мелиорации. М. : Росагропромиздат, 1989. 384 с.
9. Волкова Ю. В, Криулин К. Н., Полетаев Ю. Б. Мелиорация земель. Осушение земель. Проектирование и расчёт осушительных систем. СПб : изд-во Политехн. ун-та, 2005. 87 с.
10. Волкова Ю. В, Криулин К. Н., Полетаев Ю. Б. Мелиорация земель. Осушительные мелиорации. СПб. : изд-во Политехн. ун-та, 2009. 186 с.
11. Чугаев Р. Р. Гидравлика. Л. : Энергия, 1970. 672 с.
12. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. М. : Стройиздат, 1948. 226 с.

** Николай Викторович Арефьев, Санкт-Петербург, Россия*
Тел. раб.: +7(812)535-46-10; эл. почта: arefiev@cef.spbstu.ru

Определение характеристик сварочных искр для расчета их удаления в циклоне

Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Н.И. Ватин;
к.т.н., доцент К.И. Стрелец;
соискатель М.Б. Китаин*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: искра; гидравлическая крупность; расплавленный металл; сварка

1. Использование противоточных циклонов в качестве системы предварительной очистки и искрогашения

При проектировании системы очистки воздуха в инженерных системах промышленных предприятий необходимо учитывать особенности производств, имеющих источники горючей и взрывоопасной пыли (искр). Пожароопасные вещества присутствуют в процессах, реализуемых в нефтяной, газовой, химической, деревообрабатывающей и других отраслях промышленности.

Все мероприятия по обеспыливанию являются одновременно и мерами предупреждения пожаров и взрывов пыли, что обеспечивается устранением возможности концентрирования пыли в воздухе. Однако повреждения, вызываемые искрами, присутствующими в газовом потоке, представляют одну из главных угроз для фильтров в черной металлургии, электросталеплавильной и других отраслях промышленности.

Вода, как известно, относится к лучшим средствам гашения, однако для ряда производств применение «мокрых» систем искрогашения нежелательно, так как существует вероятность отрицательного воздействия воды на фильтрующие элементы [1,2]. Альтернативой является использование противоточного циклона в качестве системы предварительной очистки и искрогашения.

При применении циклона в качестве искрогасителя недопустима возможность вторичного уноса горящих частиц, поэтому наиболее эффективное устройство гашения искр и осаждения тяжелых частиц, которое защищает фильтрующий материал и обеспечивает равномерное перемешивание газового потока, – это противоточный тип циклона [3].

Использование циклонов для искрогашения на стадии предварительной очистки является довольно новой практикой. На данный момент такие предложения уже существуют, однако нет каких-либо исследований по эффективности улавливания горящих частиц, т.е. пыли с содержанием искры. При использовании противоточных циклонов в качестве системы предварительной очистки и искрогашения необходимо определить степень очистки воздуха от пылевых частиц. В случае содержания в пыли искры необходимо удостовериться, что горящие частицы будут полностью удалены в циклоне, т.е. эффективность их удаления на всей высоте циклона составит 100%.

Согласно литературным источникам, в инженерной практике эффективность пылеулавливания циклона выражается критериальной зависимостью: $\eta_{\omega} = f(Stk; Fr; \xi_{Ц})$, а фракционная эффективность равна отношению количества пыли данной фракции, уловленной в аппарате, к количеству входящей пыли той же фракции [4,5,6,7]:

$$\eta = \left(\frac{M^{ф}_{ул}}{M^{ф}_{н}}\right)\cdot 100 = \frac{\Phi_{ул}\cdot M_{ул}}{\Phi_{н}\cdot M_{н}} = \eta_0\,\frac{\Phi_{ул}}{\Phi_{н}},$$

где $\Phi_{УЛ}$ – процентное массовое содержание в газе частиц определенной фракции, уловленных пылеуловителем, отнесенное к массе всего материала,

$\Phi_{Н}$ – процентное массовое содержание в газе частиц определенной фракции до его поступления в пылеуловитель, отнесенное к массе всего материала.

В методиках определения эффективности циклонов Шиляева М.И. и его последователей [8] расчет циклонов основан на использовании эмпирических вероятностных функций, описывающих фракционную эффективность пылеулавливания. Вычисляется эффективность улавливания частиц в рамках возможности применения формулы Стокса, и с учетом поправок для частиц, к которым нельзя применять формулу Стокса.

В обоих случаях в основу расчета вводятся данные о диаметре удаляемых частиц [8].

При расчете эффективности очистки воздуха в противоточном циклоне с использованием модели турбулентной диффузии с конечной скоростью [9,10] в качестве основной характеристики пыли используется не диаметр, а гидравлическая крупность частиц [11,12], т.е. скорость их свободного падения.

Для определения эффективности пылеулавливания по этой методике необходимы точные характеристики пыли, содержащей горящие частицы. Однако для различных производственных условий характеристики выделяющейся пыли можно достоверно определить только опытным путем [12].

Целью данной работы является разработка методики опытного определения свойств пыли, содержащей горящие частицы, в производственных условиях. Для получения информации о характеристиках такой пыли авторами была проведена серия экспериментальных исследований. Опыты были проведены для металлических частиц пыли, выделяющихся при сварочном производстве и содержащих сварочную искру.

Под выделением сварочной искры мы понимаем разбрызгивание электродного металла, которое является следствием газодинамического удара, возникающего при испарении перемычки между сварочной проволокой и каплей.

Разбрызгивание в основном оценивается как нежелательный технический фактор, вызывающий, например, неэффективный расход сварочной проволоки, заваривание брызгами сварочных мундштуков, приваривание брызг на свариваемый материал с необходимостью его зачистки, а также как опасный производственный фактор, приводящий к ожогам, и пожароопасный фактор.

Разбрызгивание металла как источник металлической пыли, содержащей вредные вещества, до настоящего времени не рассматривалось. В то время как брызги размером в сотые и десятые доли миллиметра уже являются промышленной пылью и при скорости воздуха 0,2–0,3 м/с свободно перемещаются в пространстве производственных помещений. Брызги размером от 0,1 мм до 3 мм могут захватываться местными вытяжными устройствами и транспортироваться по воздуховодам (ГОСТ 12.4.052-78. Ткани и материалы для спецодежды и средств защиты рук. Методы определения стойкости к прожиганию).

Содержание вредных веществ в сварочных брызгах соответствует химическому составу применяемых сварочных материалов. Основной компонент сварочных материалов – железо – в соответствии с ГОСТ 12.4.052-78 относится к третьему классу токсичности.

2. Определение размерности и количества сварочной искры

К характеристикам сварочной искры относится множество параметров, таких как дальность разлета, диаметр, температура, масса, время затухания, скорость и т.д. Все параметры зависят от условий сварки и определяются экспериментальным путем.

Характеристики сварочной искры должны определяться в установившемся режиме работы, близком к режиму максимального искрообразования.

Для определения параметров сварочной искры, для наглядного отображения последствий сварки применен метод с использованием фильтровальной ткани. Схема установки представлена на рис. 1.

На рис. 2 представлено распределение прожогов фильтровальной ткани на расстоянии 200 мм от сварочной горелки. В эксперименте определено распределение брызг вокруг сварочной горелки по расположенной около неё поверхности горючего полиэфирного нетканого материала:

- непосредственно под сварочной горелкой над листом 500x500 мм;
- под сварочным столом высотой 760 мм над листом шириной 1000 мм и длиной 2000 мм.

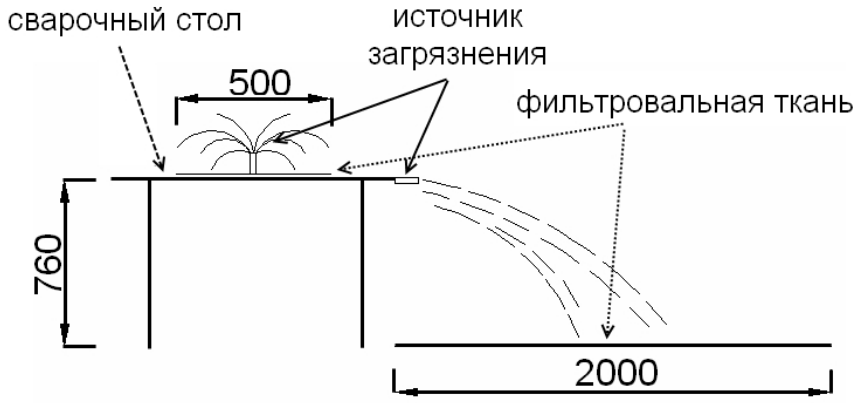


Рисунок 1. Схема проведения эксперимента по определению диаметра частиц

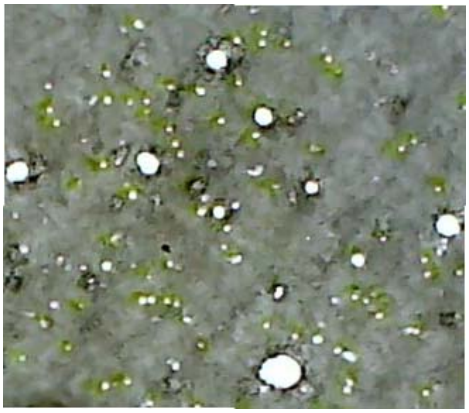


Рисунок 2. Следы прожога каплями металла нетканого полиэфирного фильтрующего материала на расстоянии 200 мм от сварочной горелки

Предварительно в эксперименте определена температура полного оплавления ткани, равная (без загорания) +400°С, и температура оплавления ткани с коксованием краев оплавления, равная +600°С.

В круге под горелкой диаметром 0,4 м, площадью 0,125 м^{2,} при расходе 26,4 грамм сварочной проволоки за 45 секунд зафиксировано 760 точек проплавления материала круглой формы диаметром от 0,3 до 6 мм, из которых 92% приходится на отверстия, проплавленные каплями диаметром от 0,3 до 1 мм, с температурой +400°С, и 8% – на отверстия, проплавленные каплями размером более 1 мм и температурой более +600°С.

При обработке результатов первого испытания лист фильтровальной бумаги был разделен на 8 секторов, и было подсчитано количество прожогов в каждом секторе в радиусе 0,1м и 0,2 м от места сварки (табл. 1)

Таблица 1. Количество прожогов в каждом секторе при первом испытании

	Кол-во	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**Итого**
Радиус 0,1 м	Прожогов	26	54	60	33	41	70	46	40	370
	Прожогов с обугливанием краев	3	2	8	2	5	9	1	2	30
Радиус 0,2 м	Прожогов	14	24	40	27	61	78	57	33	334
	Прожогов с обугливанием краев	1	2	4	2	7	8	5	2	31

Фильтровальную ткань размерами 0,5 м на 0,5 м за 45 секунд прожигает более 700 искр, причем оставляют обугленные края более 60.

При анализе результатов второго испытания лист разделили на 10 частей по 0,2 м и подсчитали количество прожогов в каждой части листа (табл. 2).

Таблица 2. Количество прожогов в каждом секторе при первом испытании

	I	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**Итого**
Расстояние от места сварки	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	
Кол-во прожогов	336	550	235	108	62	33	11	11	6	7	1359
Кол-во прожогов Ø более 3 мм	73	141	33	12	6	2	0	3	1	1	270
Плотность (кол-во прожогов на м^2)	1680	2750	1175	540	310	165	55	55	30	35	6795

Фильтровальную ткань размерами 1 м на 2 м за 45 секунд прожигает порядка 1359 искр, причем диаметром более 3 мм – 270 искр.

Из таблицы видно, что основной разлет брызг металла приходится на дистанцию до одного метра (максимум на 0,4 м) от точки сварки. Отдельные высокотемпературные брызги отлетают на расстояние до 2 метров.

Для получения информации о размерах, дальности полета и температуре брызг нами была проведена серия экспериментов.

1. Методом компьютерной обработки материалов видеосъемки процесса сварки определены скорость вылета брызг металла от сварочной горелки и скорость свободного падения брызг металла с высоты 2,8 м.
2. Методом определения стойкости к прожиганию нетканого фильтрующего полиэфирного материала по аналогии с ГОСТ 12.4.052-78 определены дальность полета, плотность потока и температура брызг.

В качестве источника брызг металла использована полуавтоматическая сварка проволокой в защитной среде – смесь аргона с CO_2 проволокой Св08Г3С диаметром 0,8 мм при токе 120 А, напряжении 19,8 В. Скорость подачи проволоки 6,6 м/мин. Время сварки 45–50 с.

На рис. 3 представлена компьютерная обработка кадра видеосъемки сварки продолжительностью 0,034 с.

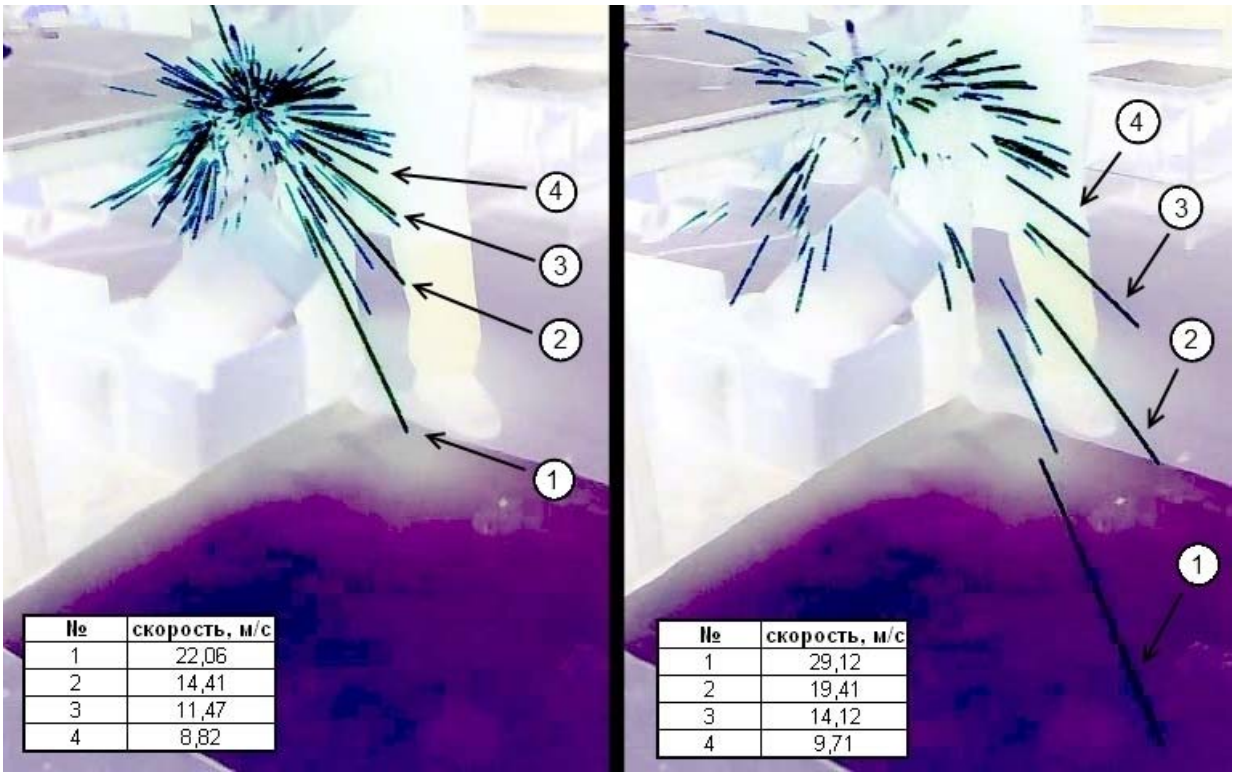


Рисунок 3. Компьютерная обработка кадра видеосъемки сварки

Основная масса брызг вылетает из сварочной горелки с начальной скоростью 4,12–8,82 м/с. Скорость полета отдельных брызг от сварочной горелки превышала 20 м/с. Такие искры при угле подъема 45 градусов могут отлететь от горелки на расстояние 1,7 и более метров.

Результаты экспериментов показывают следующее:

- основная масса брызг вылетает из сварочной горелки с начальной скоростью 4,12–8,82 м/с;
- основной разлет брызг металла приходится на дистанцию до одного метра (максимум на 0,4 м) от точки сварки;
- отдельные брызги могут отлетать от горелки на расстояние 1,7 и более метров;
- средний размер свободно падающих брызг примерно равен 0,05 мм (50 мкм);
- брызги с температурой +400°С диаметром от 0,3 до 1 мм составляют 10% массы разбрызгиваемого металла;
- брызги с температурой более +600°С размером более 1 мм составляют 90% массы разбрызгиваемого металла.

Так как воздухоприемные устройства по условиям их эффективной работы располагаются на расстоянии 0,25–0,40 м от сварочной дуги при скорости всасывания 0,3 м/с, то практически все брызги размером до 1 мм и крупнее, выбрасываемые в сторону воронки вытяжного устройства, могут захватываться в систему удаления и очистки пыли. Скорости транспортировки 16 м/с достаточно для того, чтобы брызги долетели до фильтровальной ткани (она должна быть в 2–2,5 раза больше скорости витания наиболее крупных частиц).

3. Определение гидравлической крупности искр

Поскольку большинство частиц являются «горящими», при определении их диаметра наблюдаются значительные погрешности, вследствие того, что они представляют собой частицу и присоединенный кислород. Формы частиц зачастую далеки от сферических. В связи с этим предложено использовать в качестве основной характеристики частиц их гидравлическую крупность [11,12], т.е. скорость свободного падения.

Для определения средней скорости падения сварочной искры использован метод сварки с высоты. Схема установки представлена на рис. 4. Перед проведением опыта была задана база, с верхней отметкой 1,4 м. В качестве нижней отметки был принят уровень пола. Чтобы движение частицы было равномерно, необходимо поднять источник выделения частиц над верхней отметкой базы на уровень, необходимый, чтобы погасить ускорение частицы. Была выбрана высота источника частиц 2,8 м. С отметки 2,8 м производилась сварка с защитой аргон плюс CO_2. Диаметр стальной проволоки 0,8 мм. Сила тока 120 А, напряжение 19,8 В. Сварка длилась 50 секунд со скоростью 6,6 м/мин. Таким образом, было израсходовано 5,5 м проволоки.

Рисунок 4. Схема проведения эксперимента по определению гидравлической крупности частиц

В результате проведенных исследований была определена гидравлическая крупность частиц.

На рис. 5 представлена компьютерная обработка треков свободного падения (гидравлической крупности) раскаленных частиц. Для устранения влияния скорости вылета частиц от дуги, сварочная дуга поднята на высоту 2,8 м. База регистрации частиц установлена на высоте от 0 до 1,45 м от уровня пола, где выравнивалась скорость свободного падения раскаленных брызг. Результаты измерения гравитационной гидравлической крупности w раскаленных брызг приведены в табл. 3.

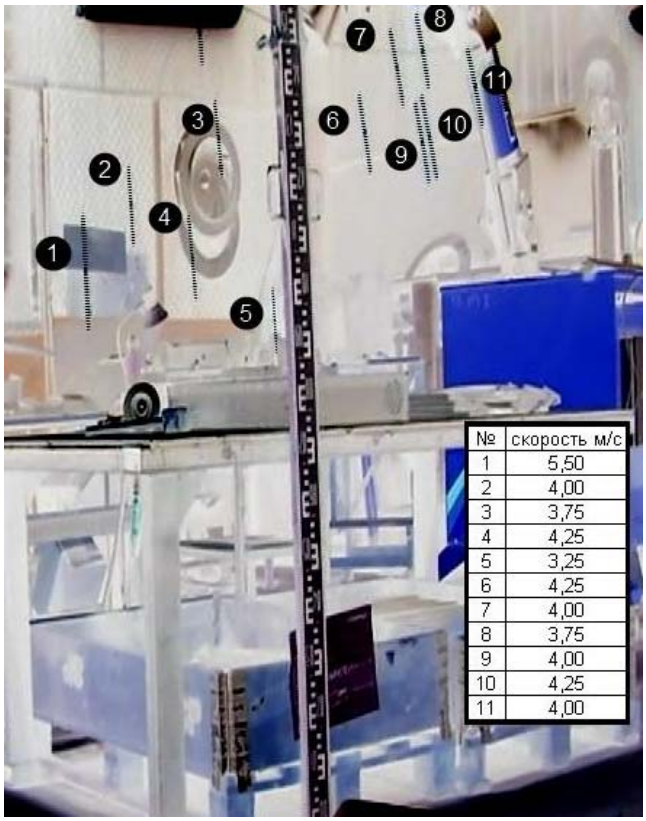


Рисунок 5. Компьютерная обработка трасс свободного падения раскаленных брызг металла продолжительностью 0,04 с

Таблица 3. Определение скорости свободного падения – гравитационной гидравлической крупности брызг металла

№ изм	w, м/с	№ изм	w, м/с	№ изм	w, м/с	№ изм	w, м/с	№ изм	w, м/с
1	6,25	11	4,38	21	4,00	31	3,83	41	2,95
2	3,75	12	5,50	22	4,69	32	4,25	42	3,50
3	6,00	13	4,00	23	5,00	33	5,00	43	5,83
4	4,50	14	3,75	24	5,08	34	4,75	44	4,38
5	3,50	15	4,25	25	4,64	35	4,25	45	3,94
6	3,61	16	4,25	26	5,17	36	4,75	46	5,13
7	5,42	17	4,00	27	4,06	37	3,50	47	4,93
8	4,06	18	3,75	28	3,38	38	5,75	48	4,06
9	3,75	19	4,00	29	3,45	39	4,25	49	3,72
10	3,89	20	4,25	30	3,30	40	3,75	50	6,64
$w_{ср}$	**4,41**	**$w_{ср}$**	**4,21**	**$w_{ср}$**	**4,41**	**$w_{ср}$**	**4,57**	**$w_{ср}$**	**4,38**
$w_{ср}$	**4,4 м/с**								

Средняя скорость падения 4,4 м/с. Среднеквадратическое отклонение 0,62, что составляет 12%.

Точность измерения времени, как для экспериментов в случае использования секундомера, следует принять 0,5 сек, а в случае компьютерной обработки материалов видео съемки – 0,1 сек. Следует учитывать, что свойства частиц будут различны для различных производств, в зависимости от индивидуальных особенностей сварочного оборудования, материалов и технологии сварки.

Полученные средние значения мало отличаются друг от друга в различных сериях опытов, среднеквадратическое отклонение составляет не более 15%. Таким образом, методика определения гидравлической крупности w, описанная выше, представляется вполне реализуемой в производственных условиях и не требующей специального оборудования и подготовки персонала для проведения опыта.

Выводы

Полученные в ходе проведенных опытов характеристики сварочной пыли могут быть использованы для расчета эффективности пылеудаления в циклоне с использованием различных методик.

Однако при использовании данных о диаметре горящих частиц следует вводить поправку на тот факт, что диаметр прожогов может превышать реальный диаметр частицы из-за обугливания краев. Гидродинамические характеристики (масса, характер взаимодействия с окружающей средой, эффективный диаметр) при движении горящей частицы также изменяются.

Гидравлическая крупность, определяемая во второй серии опытов, интегрально учитывает все эти факторы и может быть использована для расчета циклонов по методике, основанной на модели турбулентной диффузии с конечной скоростью [11,12]. Предложенная методика расчета гидравлической крупности достаточно проста для реализации в производственных условиях

Литература

1. Солодский С. А. Брунов О. Г. Влияние газодинамического удара на разбрызгивание электродного металла при сварке в активных газах // Современные техника и технологии : труды Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 26−30 марта 2007 г. С. 363-365.
2. Федько В. Т. Теория, технология и средства снижения набрызгивания и трудоемкости при сварке в углекислом газе. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1998. 432 с.
3. Ватин Н. И., Чечевичкин В. Н., Чечевичкин А. В. Особенности сорбционно-каталитической очистки воздуха в помещениях обитания человека в условиях крупных городов // Инженерно-строительный журнал. 2011. №1(19). С. 24-27.
4. Hoffmann A. C., Stein L. E. Gas Cyclones and Swirl Tubes. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verl., 2002. 421 p.
5. Syeda Noori Banu P., Syeda Arshi Banu P.. Simulation and empirical modeling of a Design of Cyclonic separator to combat air pollution // International Journal of Engineering Science and Technology. 2011. Vol. 3. No. 6. Pp. 4857-4878.
6. Zhongchao Tan. Mechanism of particle separation in aerodynamic air cleaning : PhD. Illinois : Urbana, 2004. 14 p.
7. Ужов В. Н. и др. Очистка промышленных газов в металлургии. М. : Химия, 1981. 312 с.
8. Шиляев М. И., Шиляев А. М., Грищенко Е. П. Методы расчета пылеуловителей : учеб. пособие для студ. вузов. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2006. 384 с.
9. Гиргидов А. Д. Турбулентная диффузия с конечной скоростью / СПбГТУ. СПб., 1996. 259 с.
10. Стрелец К. И. Оценка эффективности осаждения частиц в циклонах пылеудаления в циклоне // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 4. С. 138-143.
11. Стрелец К. И. Численное решение уравнений турбулентной диффузии в закрученном потоке газа // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. №5 (108). С. 156-160.
12. Стрелец К. И. О характеристиках пыли, используемых при расчете эффектиности пылеудаления в циклоне // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 110. С. 222-226.

**Михаил Борисович Китаин, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)335-00-33; эл. почта: kmb777@gmail.com

О численном расчете коэффициента ассимиляции переменных теплопоступлений при автоматизации систем обеспечения микроклимата

К.т.н., доцент О.Д. Самарин*;
аспирант С.С. Азивская,
ГОУ ВПО Московский государственный строительный университет

Ключевые слова: система автоматического регулирования; теплоустойчивость; коэффициент передачи; коэффициент ассимиляции; расчетная тепловая нагрузка

При проектировании автоматизированных систем вентиляции и кондиционирования воздуха (СВ и КВ) основной особенностью является необходимость расчета нестационарного теплового режима обслуживаемого помещения с учетом автоматического регулирования СВ и КВ и переходных процессов в их оборудовании, связанных с изменением параметров наружного и внутреннего воздуха с течением времени.

При этом сама СВ и КВ и ее система автоматического регулирования (САР) образуют для помещения отрицательную обратную связь по каналу «теплопоступления $Q_{возм}$ – $t_в$», так как входной информацией для их работы является величина отклонения температуры внутреннего воздуха $t_в$ от заданного среднего уровня (уставки), а результатом их действия – тепловой поток $Q_{рег}$, который добавляется к $Q_{возм}$, полностью или частично компенсируя его и внося, таким образом, дополнительное стабилизирующее воздействие в систему «помещение–СВиКВ–САР» [1].

Можно показать [2], что за счет совместного использования собственной теплоустойчивости помещения и регулирующего влияния САР максимальная величина $Q_{рег}$ может оказаться меньше наибольшего значения $Q_{возм}$. Следовательно, установленная мощность оборудования СВ и КВ, которая как раз и определяется параметром $Q_{рег}$, будет ниже максимальных теплопоступлений. Это позволяет сократить габариты вентиляционных установок, а также размеры воздуховодов, каналов и воздухораспределителей за счет снижения воздухообмена в помещении, который при обеспечении ассимиляции теплоизбытков должен вычисляться так же по величине $Q_{рег}$.

В работе [2] приводится приближенное выражение для расчета требуемой величины $Q_{рег}$ в зависимости от требований к качеству поддержания внутреннего микроклимата, характеристик помещения и САР при регулярных колебаниях $Q_{возм}$. Оно получено из уравнения теплового баланса помещения, обслуживаемого регулируемой СВ и КВ. Однако представляет интерес проверка данной формулы с помощью численного эксперимента, основанного на использовании математической модели, описывающей процессы нестационарного теплопереноса в легких и массивных ограждениях помещения и теплообмена на их внутренних поверхностях. Модель использует решение системы дифференциальных и алгебраических уравнений теплопереноса и теплового баланса методом конечных разностей [3] по разработанной авторами программе для ЭВМ на алгоритмическом языке Fortran [4].

В процессе расчетов осуществлялось сравнение результатов вычисления основного параметра – коэффициента ассимиляции переменных теплопоступлений $K_{асс}$, представляющего собой отношение амплитуд колебаний $Q_{рег}$ и $Q_{возм}$, по методике [2] и по рассматриваемой численной модели при различных значениях эквивалентного коэффициента передачи СВ и КВ и САР $K_{рег}$ в условиях использования простейшего П-закона регулирования. По своему физическому смыслу величина $K_{рег}$, Вт/К, показывает в данном случае, на сколько ватт нужно изменять величину $Q_{рег}$ при отклонении $t_в$ от уставки $t_{в.0}$ на 1 К. Такое изменение и должна обеспечить соответствующим образом подобранная САР.

Исследования производились для помещения со следующими характеристиками:

- $\sum KF_л$=4 Вт/К – сумма произведений коэффициентов теплопередачи $K_л$, Вт/(м^2·К), наружных «легких» ограждений помещения (условно безынерционных, например, окон) на их площади $F_л$, м^2;
- показатель теплопоглощения инфильтрующимся воздухом $Lc_в\rho_в$ = 14 Вт/К,
  где L – неорганизованный воздухообмен в помещении, м^3/с, $c_в$ и $\rho_в$ – соответственно удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), и плотность, кг/м^3, этого воздуха;
- $\alpha_{к.в}$ = 3.7 Вт/(м^2·К) –коэффициент конвективного теплообмена на внутренних поверхностях;
- $\sum F_м$ = 74 м^2 – площади массивных ограждающих конструкций, м^2; $t_н$ = –28°С – температура наружного воздуха [5];
- $t_{в.0}$ = +20°С – контролируемое значение $t_в$ [6];
- амплитуда колебаний $Q_{возм}$ равна 1350 Вт.

Теплофизические параметры материальных слоев массивных ограждений принимались в соответствии с [7] с учетом рекомендаций [8].

Уровень $K_{рег}$ в расчетах менялся от 0 до 290 Вт/К (при дальнейшем его увеличении теряется устойчивость конечно-разностной схемы при использованных шагах по времени и пространственной координате). Ясно, что при росте $K_{рег}$ и одном и том же значении амплитуды $Q_{возм}$ коэффициент $K_{асс}$ должен возрастать, поскольку возрастает доля регулирующего воздействия. На рис. 1 показаны результаты вычисления $K_{асс}$ при относительной величине конвективной составляющей $q_к$ в теплопоступлениях, равной 1 (сплошные линии) и 0.4 (пунктирные). Тепловой поток, вносимый в помещение за счет работы СВ и КВ, во всех случаях считается чисто конвективным, так как имеются в виду воздушные системы. Черным цветом обозначены данные, полученные по методике [2], красным – по численной модели. В последнем случае значение $K_{асс}$ рассчитывалось непосредственно по определению, как отношение фактической амплитуды $Q_{рег}$ к заданной амплитуде $Q_{возм}$.

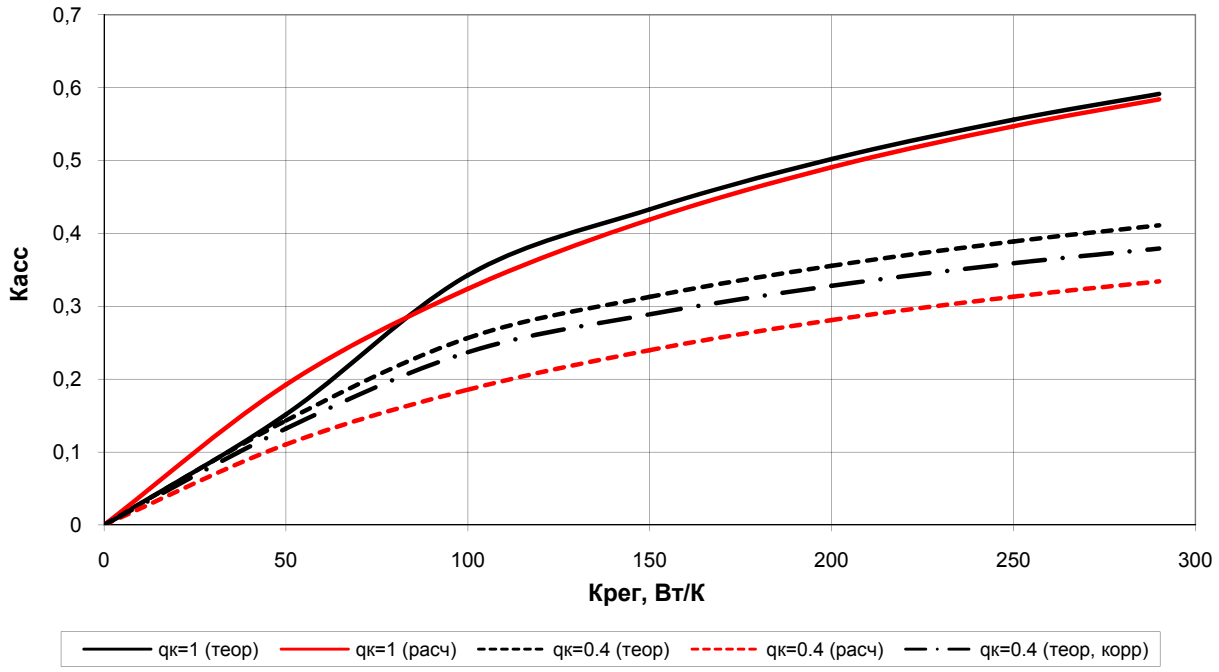


Рисунок 1. Зависимость коэффициента $K_{асс}$ от параметра $K_{рег}$ при различных $q_к$ для характерного помещения

Легко видеть, что при $q_к$=1 численный расчет дает весьма близкую сходимость с аналитическим – во всяком случае, отклонение не превышает по абсолютной величине 0.05, а, как правило, оказывается значительно меньше. Это вполне укладывается в обычную погрешность инженерных методов. Следует только иметь в виду, что для минимизации расхождения необходимо несколько уточнить предлагаемую в [2] формулу для вычисления показателя теплопоглощения ограждающих конструкций помещения в условиях автоматического регулирования СВ и КВ и принимать коэффициент в ее числителе равным 1.25 независимо от средней теплоинерционности ограждений и величины $q_к$:

$$P_{огр} = \frac{1.25}{1/\Sigma YF + q_к/\Sigma\alpha F}, Вт/К, \quad (1)$$

где ΣYF – суммарный показатель теплоусвоения внутренних поверхностей ограждений [9], Вт/К;
$\Sigma\alpha F$ – то же для конвективного теплообмена;
$\Sigma\alpha F = \alpha_{к.в}\Sigma F$, Вт/К.

Здесь $\Sigma F = \Sigma F_м + F_л$ – суммарная площадь поверхностей, обращенных в помещение, м^2. В зарубежной литературе до некоторой степени подобный подход к определению характеристик помещения есть, например, в работе [10] и соответствующих нормах [11]. Значения параметров ΣYF и $\Sigma\alpha F$ рассчитывались автоматически по рассмотренной программе. Таким образом, полученное уточнение приводит к дальнейшему упрощению соотношения для $P_{огр}$. По сути, в данном случае произведена идентификация аналитической модели по результатам численного эксперимента с одновременным выявлением факторов, влиянием которых на искомую величину можно пренебречь.

При $q_к$=0.4, что более точно отражает наиболее часто встречающиеся условия с преимущественным поступлением в помещение лучистой теплоты, например, от солнечной радиации, сходимость оказывается несколько хуже, но все же и здесь максимальное отклонение не превышает 0.08–0.09. Заметим, что приближенный аналитический метод во всей области изменения $К_{рег}$ дает несколько преувеличенное значение $К_{асс}$, т.е. с некоторым запасом, что само по себе является положительным обстоятельством. Для снижения погрешности и доведения ее до 0.05 целесообразно уточнить предложенную в [2] зависимость для B_o – поправочного коэффициента к $К_{асс}$, учитывающего, что $q_к$<1, опять-таки в сторону упрощения, а именно исключения из нее множителя 0.7 при отношении $\Sigma YF / \sum \alpha F$:

$$B_o = \frac{1 + q_к \Sigma YF / \Sigma \alpha F}{1 + \Sigma YF / \Sigma \alpha F}, \text{ (безразмерный).} \quad (2)$$

Соответствующий график приведен на рис. 1 черной штрихпунктирной линией.

Таким образом, мы подтвердили, что расчетную тепловую нагрузку на помещение, обслуживаемое автоматизированными СВ и КВ, действительно можно определять по методике [2]:

$$Q_{рег} = Q_{ср} + К_{асс} A_q \text{, Вт, где } К_{асс} = A(1 - B \cdot R_{дин}) B_o . \quad (3)$$

Здесь $R_{дин} = \frac{A_{tв} P_{пом}}{A_q}$ – динамический коэффициент регулирования СВ и КВ (также безразмерный);

А и В – параметры, зависящие в общем случае от применяемого закона регулирования и некоторых других условий.

При П-законе можно ориентировочно принимать при $R_{дин}$>0.75 А=1.15, В=1; при $R_{дин}$ < 0.75 А=1, В=0.9. Обозначения A_q и $Q_{ср}$ представляют собой соответственно амплитуду колебаний и среднее значение величины $Q_{возм}$, а $A_{tв}$ – допустимое отклонение $t_в$ от уставки, задаваемое исходя из условий комфортности [6] или (в зарубежной практике) [12]. Показатель теплопоглощения помещения $P_{пом}$ в рассматриваемых условиях равен $P_{огр}$ + $Lc_в\rho_в$. При этом значения $P_{огр}$ и B_o следует вычислять по уточненным формулам (1)-(2). Методика сохраняет инженерный вид и доступна для использования в инженерной деятельности.

Литература

1. Калмаков А. А. и др. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции. М. : Стройиздат, 1986. 479 с.
2. Самарин О. Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. М. : АСВ, 2009. 296 с.
3. Теория тепломассообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. М. : Изд-во МГТУ, 1997. 684 с.
4. Самарин О. Д., Азивская С. С. Принципы расчета нестационарного теплового режима помещения, обслуживаемого автоматизированными системами обеспечения микроклимата // Известия вузов. Строительство. 2011. № 1. С. 59–62.
5. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. М. : ГУП ЦПП, 2004.
6. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М. : ГУП ЦПП, 1999.
7. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. М. : ГУП ЦПП, 2004.
8. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита здания. М. : ГУП ЦПП, 2003.
9. Богословский В. Н. Строительная теплофизика. М. : Высшая школа, 1982. 415 с.
10. Keller B., Magyari E. A simple calculation method of general validity for the design-parameters of a room/building, minimizing its energy and power demand for heating and cooling in a given climate. Zurich, 1998. 57 p.
11. EN ISO 13786. Thermal Performance of Building Components – Dynamic thermal characteristics – Calculation methods.
12. ISO 7730. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

**Олег Дмитриевич Самарин, Москва, Россия*

Тел. раб.: +7(499)188-36-07; эл. почта: samarin1@mtu-net.ru

Математический анализ качества поддержания параметров в прецизионных технологических СКВ

Д.т.н., профессор А.Г. Сотников*,
НП «АВОК-Северо-Запад»

Ключевые слова: технология; параметры; точность; равновесная влажность; гармонический анализ; экспоненциальная функция; амплитуда

Многочисленные и разнообразные технологические процессы в промышленности протекают чаще всего в воздухе. Они предъявляют разные требования к уровню параметров состояния и состава воздушной среды и точности их поддержания. До последнего времени не существует строгих аналитических методик, позволяющих достоверно определять фактическую точность поддержания параметров воздушной среды в условиях их упорядоченного или стохастического изменения на действующем объекте.

В настоящее время существует несколько способов определения требуемых технологических параметров и их допустимых отклонений:

- на основе отраслевых нормативов или задания инженеров-технологов данного производства;
- на основе данных табл. 15.1 [1] или табл. 2.5-2.7 [2]; фрагмент таких данных для основных производств представлен в табл. 1;
- на основе литературных данных для рассматриваемого технологического процесса.

Таблица 1. Оптимальные технологические параметры воздуха в некоторых производственных и общественных зданиях и помещениях

№ п/п	Наименование помещений	Параметры	
		t_B,°C	φ_B,%
	Архивы, библиотеки, хранилища	18±1	55±5
	Хирургическая операционная и послеоперационная	22…25	55…60
	Лаборатории исследования металлов	20	40
	Термоконстантные помещения для прецизионных работ: группа 3	20±0,2	40
	Цехи точного машиностроения	20	40…50
	Цехи электронно-технического производства	20	45…50
	Склады фармацевтических материалов	20…25	30…35
	Склад табака	18…24	75…80
	Цехи пивоваренного производства:		
	солодовня бродильный	12 4…8	80…85 60…65
	Цех шлифовки линз	24	80
	Многоцветная литография (офсет)	24…26	46…48
	Производство капронового корда	19	47

Примечание: обращают на себя внимание разные диапазоны и разная точность поддержания температуры и относительной влажности в разных технологических процессах, хотя сама точность в таблице не указана.

Нормируемые параметры воздушной среды при всей их важности не следует абсолютизировать, так как они в принципе являются переменными, зависящими от технологического процесса, изменчивости свойств гигроскопического сырья и других составляющих производства. По мере развития той или иной технологии или при появлении новых технологий требования к параметрам и точности их соблюдения непрерывно возрастают, что в конечном счете обеспечивает качество и сортность выпускаемой продукции, уменьшение брака и соответствующих затрат. Особенно это заметно в передовых и быстроразвивающихся отраслях современных технологий и производств.

С изменением и совершенствованием технологических процессов нормируемые параметры воздуха могут меняться, что может потребовать соответствующих запасов по воздуху, холоду и теплоте (т.н. *гибкие* технологии). Кроме того, потребуется изменение заданий (уставок) соответствующих регуляторов и контроллеров. Наиболее сложно обеспечить уменьшение отклонения, что достигается обычно комплексом мер. Среди них:

- уточнение и сокращение зоны стабилизации параметра;
- анализ основных возмущений (тепло- или влаговыделений) в этой зоне;
- выведение возмущений из зоны термо- или влагостатирования;
- выбор метода стабилизации параметра: особочувствительными датчиками или генерированием высокочастотных колебаний [3];
- выбор закона регулирования параметра (обычно ПИ или P_c);
- выбор аппаратов контура стабилизации и снижение их инерционности.

При анализе отклонений параметров нужно учитывать: вид параметра (t_B, φ_B, d_B, i_B, v_B, c_B и др.), его отклонение (статическое, динамическое, амплитудное), знак отклонения, частоту колебаний и их совокупное влияние на объект, требующий стабилизации.

Все технологические процессы по степени влияния на них параметров состояния и состава воздушной среды можно разделить условно на такие группы (рис. 1):

- не требует специальных параметров воздуха;
- требует *обычных* параметров и их отклонений (±1ºС, ±7%), как и в комфортных системах;
- требует повышенной точности поддержания параметров (±0,05…0,5ºС; ±1…5%) и (или) повышенной чистоты [4];
- протекает в специальной камере, где заданы не обычные, а повышенные или пониженные уровни параметров, и/или их программного изменения и др.[3].

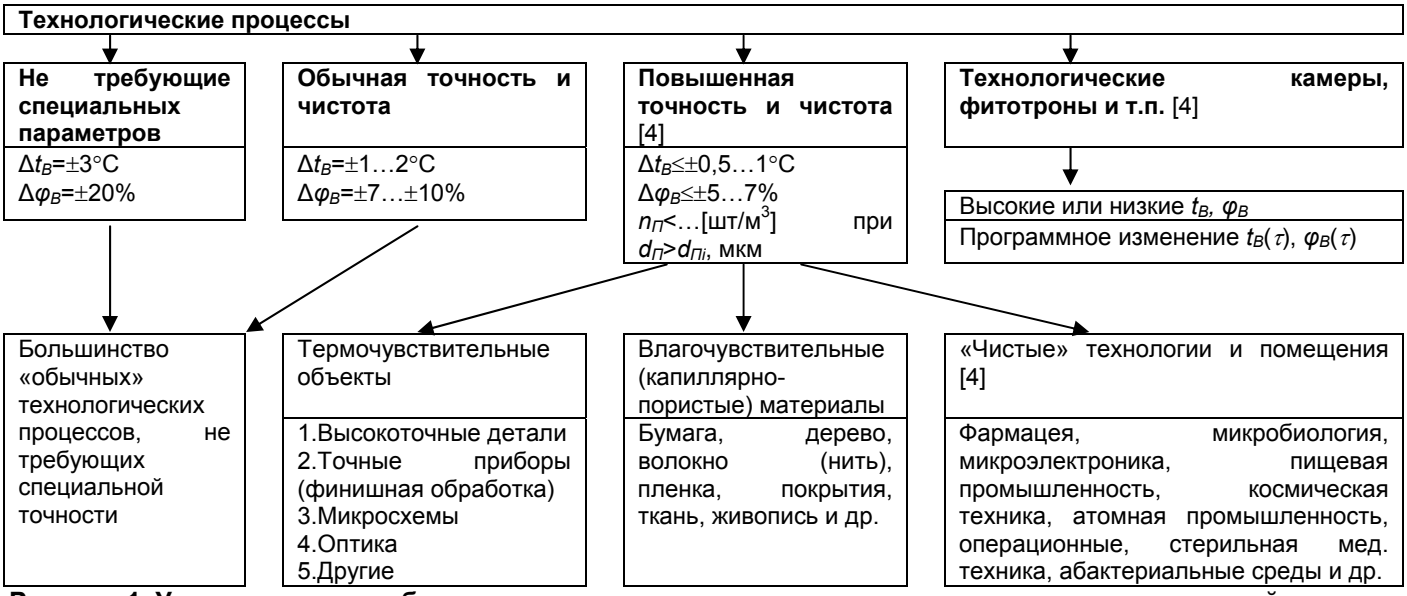


Рисунок 1. Условная схема, объясняющая возможные связи заданных параметров воздушной среды с технологическим процессом

При технологическом кондиционировании должна быть определена та зона, где установлено оборудование, требующее данных параметров. В случае если такая зона по площади мала, целесообразно местное кондиционирование; в остальной части помещения могут поддерживаться другие параметры с большими отклонениями. При точной обработке и сборке первостепенна стабилизируемая температура, для гигроскопических (капиллярно-пористых) материалов – относительная влажность, в чистых технологиях кроме точного поддержания параметров жестко регламентируется содержание аэрозолей и микрофлоры в воздухе и др. параметры. В некоторых объектах эти жесткие требования могут совпадать, как, например, в микроэлектронике [5]. Однако при ее анализе нужно учитывать, что за истекшие два десятилетия с момента публикации этих материалов объект различения в микроэлектронике уменьшился с величины одного микрона до его десятых долей.

Методы обеспечения особоточных температурно-влажностных условий и повышенной чистоты воздушной среды подробно описаны в книге автора [3].

Стабилизация равновесной влажности материалов выделена отдельно в связи с ее особой востребованностью с одной стороны и большой сложностью – с другой. Последнее объясняется разнообразием технологических процессов, связанных с обработкой и хранением многочисленных гигроскопических, иначе капиллярно-пористых тел, например бумаги, волокна, нити, ткани, холста, пленки, кожи, изделий микроэлектроники, а также в музеях, архивах и на складах сырья и продукции. Как правило, это тонкие материалы, которые поэтому особенно подвержены тепловлажностным воздействиям. Особая точность требуется в лабораториях контроля качества соответствующих производств.

Физически более правильно было бы описывать влажностные свойства воздуха влагосодержанием или парциальным давлением водяных паров. Если свойства объекта кондиционирования связаны с влажностью его материала, то для обоснования требований к влажности окружающего воздуха необходим анализ процессов влагообмена, происходящих на поверхности контакта материала с воздухом. Подобный анализ на примере *поведения* ограждающих конструкций старинных зданий выполняют в строительной теплофизике. Эти процессы по физическим законам сложнее тепловых и происходят совместно с ними. При математическом описании процессов массообмена допустима формальная аналогия с теплообменом.

Зависимость свойств капиллярно-пористых веществ от влажности окружающего воздуха комплексно представляется в виде характерных кривых равновесной влажности, приводимых в справочных изданиях [6]. От массы накопленной влаги зависят многие свойства материалов: прочность, жесткость, обрывность, электропроводность, адгезия и другие, которые изучают инженеры-технологи. Динамические характеристики этих материалов как гигроскопических объектов при изменении влажности окружающего воздуха зависят от структуры материала и его пористости, плотности, толщины и др. параметров. Например, лист тонкой бумаги при изменении φ_B меняет свою массу и свойства значительно быстрее, чем кожаная заготовка. Динамические свойства, определяемые экспериментальным путем, характеризуются постоянной времени T_M приближенно экспоненциального переходного процесса массообмена.

Основной физической величиной, определяющей способность гигроскопического материала менять свои свойства в зависимости от влажности окружающего воздуха φ_B (%), является т.н. **равновесная влажность материала** U (кг/кг). Она показывает отношение массы поглощенной или выделенной влаги к массе абсолютно сухого материала и представляется в виде кривых сорбции-десорбции в зависимости от φ_B. Характерные кривые равновесной влажности для некоторых капиллярно-пористых материалов заимствованы в фундаментальном справочнике [6] – см. рис. 2.

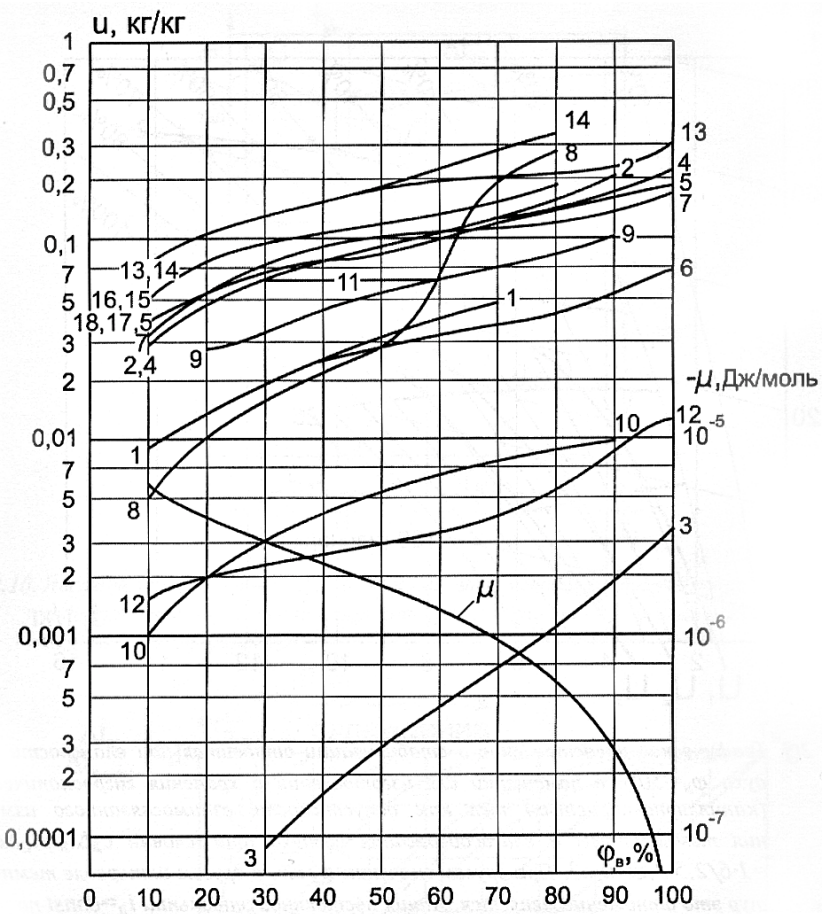


Рисунок 2. Кривые равновесной влажности U (кг/кг) и усредненный химический потенциал *μ* (Дж/моль) некоторых гигроскопических (капиллярно-пористых) материалов по данным Л.М. Никитиной [6]: 1 – капроновое волокно; 2 – древесина; 3 – кирпич легкий глиняный ρ=1100 кг/м³; 4 – лен (пряжа); 5 – мука; 6 – пенобетон ρ=800 кг/м³; 7 – пенька; 8 – полиуретан; 9 – полотно столовое; 10 – резина (шины); 11 – селикагель; 12 – слюда; 13 – солод; 14 – табак листовой; 15 – ткань шерстяная; 16 – хлопок; 17 – шелк натуральный; 18 – шерсть

Среди представленных материалов можно найти разные по их свойствам. Например, кирпич (линия *3*) меняет равновесную влажность почти на два порядка, хотя она остается весьма малой (U_{max}≈0,003). Такие материалы, как листовой табак (линия *14*) или лен (линия *4*) меняют равновесную влажность в меньшем диапазоне, однако эта величина оказывается большой (U_{max}≈0,2 – 0,3). Подобные зависимости используют для выбора относительной влажности воздуха и ее допустимого изменения в конкретном технологическом процессе (см. далее рис. 4).

Вышеизложенное отнюдь не исключает и другое объяснение зависимости технологических процессов от влажности воздуха (по Ю.Н. Хомутецкому). Постоянство φ_B просто означает определенную взаимосвязь приращений Δt_B и Δd_B (рис. 3). Иначе – процесс зависит одновременно от t_B и d_B, но так, что если выдерживать их приращения в определенной взаимосвязи, то влажность будет постоянна, а технологический процесс –

иметь минимум потерь. Например, если требуется точно стабилизировать φ_B=50% при температуре около t_B=20°±2°С, то это значит, что допустимые отклонения t_B и d_B связаны соотношением $\Delta t_B/\Delta d_B \approx 2$°С/(г/кг).

Характерный пример зависимости прочностных свойств (изоперм) бумаги как объекта длительного хранения (фонды, архивы) [8] от температуры и влажности воздуха, и одновременно нити в технологическом процессе прядения хлопка по данным [9] показаны на *t-φ* диаграмме рис. 4.

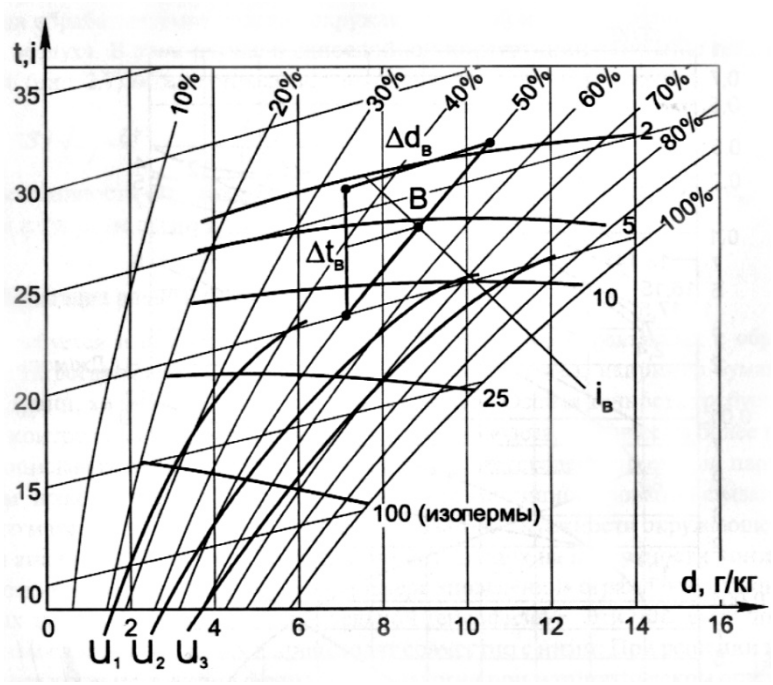


Рисунок 3. Графическое представление о стабилизации относительной влажности воздуха в помещении φ_B=50% для изготовления и хранения гигроскопических (капиллярно-пористых) тел, как допустимость взаимосвязанного изменения температуры и влагосодержания воздуха при условии $c_B\Delta t_B/i_П\Delta d_B \approx 1\cdot6/2{,}5\cdot3{,}8=0{,}63$. При другом значении φ_B или в другом интервале температур это отношение меняется. Линия постоянной энтальпии i_B=*const* по условию $c_B\Delta t_B=-i_П\Delta d_B$ почти нормальна к изолинии φ_B. Для сравнения здесь же нанесены т.н. изопермы (линии постоянной долговечности бумаги) по данным Библиотеки Конгресса США [7] и линии постоянных влагосодержаний (равновесной влажности) *U* капиллярно-пористых материалов, полученные на основании анализа их изотерм сорбции-десорбции [6]

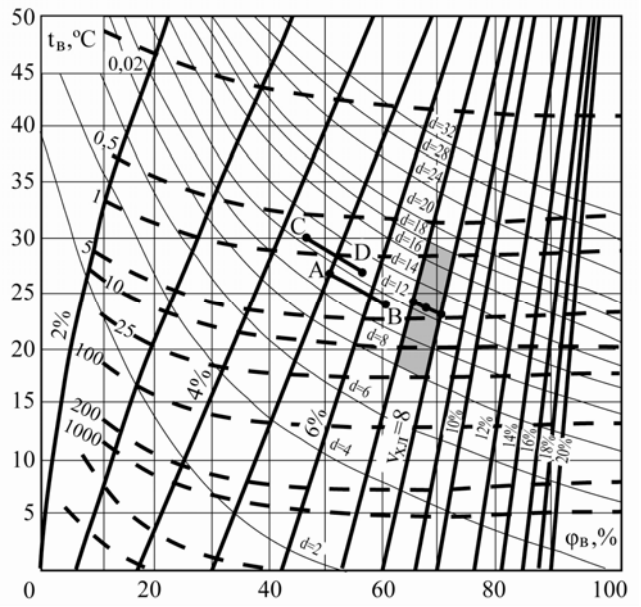


Рисунок 4. Диаграмма *t-φ* влажного воздуха с нанесением изоперм (0,02…1000) – изолиний равной прочности (долговечности) бумаги и рекомендуемых параметров (AB, CD) для прядения в холодный и теплый период года при оптимальной равновесной влажности хлопка $U_{опт}$=7 – 8% и допустимом отклонении ΔU=1,5%

Из этих данных следует, что изопермы сложным образом зависят от сочетания t_B и φ_B, при этом с понижением температуры воздуха от 42°С до 5°С прочность бумаги возрастает от 0,02 до 1000, т.е. на пять порядков (!).

Специальные системы технологического кондиционирования воздуха для объектов, где задана высокая точность поддержания температуры и (или) относительной влажности, а также для чистых технологий описаны в гл. 2. [3].

Рассмотрим далее математические зависимости, на основе которых можно оценить статическое и амплитудное изменение того или иного параметра. **Закон изменения** как понятие используют при упорядоченном (периодическом) изменении всей нагрузки, ее отдельной составляющей или конкретного параметра. При любой форме периодической кривой применяют гармонический анализ, заменяя эту кривую средним значением Q_{cp} (нулевой гармоникой) и несколькими гармониками с амплитудами A_{Q_k}, периодами изменения τ_n/k и начальными фазами $\tau_{0.k}$ в соответствии с уравнением:

$$Q(\tau) \approx Q_{cp} + \sum_{1}^{k} A_{Q_k} \cos\left[2\pi k\left(\tau - \tau_{0.k}\right)/\tau_n\right]. \quad (1)$$

Чем ближе форма кривой $Q(\tau)$ к синусоиде, тем меньшим числом гармоник можно описать эту функцию. При равенстве полупериодов для четной функции, когда $Q(-x)=Q(+x)$, центрированной относительно математического ожидания $M(Q)$ при $x=0$ в разложении (1) остаются только нечетные гармоники (первая, третья, пятая и т.д. – см. рис. 5).

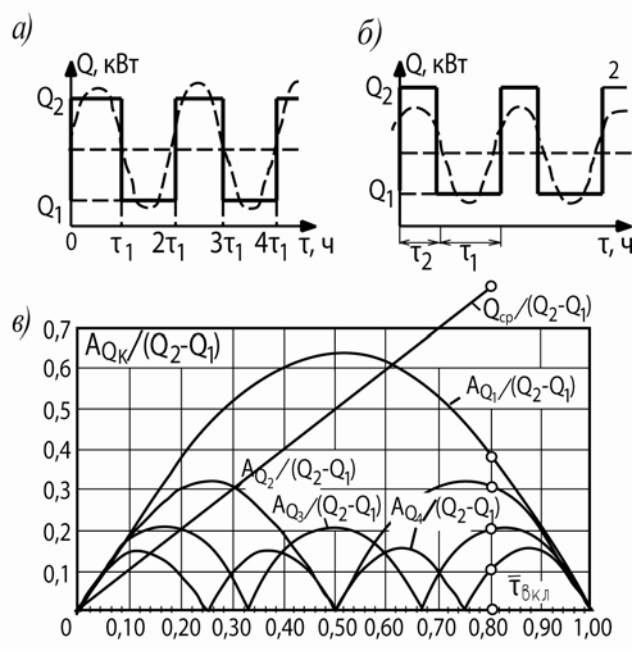


Рисунок 5. График ступенчато изменяющейся периодической нагрузки или отдельной составляющей и определение амплитуд первых гармоник разложения такой кривой в ряд Фурье при произвольном соотношении полупериодов включения-выключения:

$$\overline{\tau}_{вкл} = \tau_{вкл} / \left(\tau_{вкл} + \tau_{выкл}\right) = 0...1:$$

а **– график периодического изменения тепловой нагрузки при равных полупериодах;**
б **– то же, при неравных полупериодах;**
в **– график амплитуд основных гармоник разложения ступенчатой периодической функции при произвольном соотношении полупериодов** $\overline{\tau}$.

Пример 1. Для условий разложения в гармонический ряд ступенчато включаемой мощности $Q_2-Q_1=50$ кВт при относительном времени включения $\overline{\tau}_{вкл} = 0,8$ определить по рис. 5, в амплитуды гармоник разложения мощности.

При относительном времени включения мощности $\overline{\tau}_{вкл} = 0,8$, $\Delta Q_{ср}=0,8(Q_2-Q_1)=0,8\cdot 50=40$ кВт, $A_{Q_1} = 0,38\left(Q_2 - Q_1\right) = 0,38 \cdot 50 = 19$ кВт, $A_{Q_2} = 0,30\left(Q_2 - Q_1\right) = 0,30 \cdot 50 = 15$ кВт, $A_{Q_3} = 0,20\left(Q_2 - Q_1\right) = 0,20 \cdot 50 = 10$ кВт, $A_{Q_4} = 0,10\left(Q_2 - Q_1\right) = 0,10 \cdot 50 = 5$ кВт.

Периодичность изменения нагрузки или отдельной ее составляющей – это следствие периодического характера воздействий внешней среды или технологического процесса. Например, суточную периодичность имеет солнечная радиация при безоблачном небосводе, суточный ход температуры наружного воздуха происходит приближенно гармонически с амплитудой A_{t_H}, периодична работа единичного оборудования, станков, двигателей, осветительных приборов, печей, сушил, сварочных постов и т.д. Строгая периодичность, т.е. постоянство полупериодов включения-выключения, не является обязательным условием для анализа, можно учитывать диапазон этих полупериодов и усреднять его.

Для каждой кривой периодического изменения нагрузок проводят гармонический анализ, для солнечной радиации в расчетные летние сутки он описан в статье [10], для периодической ступенчато-изменяющейся нагрузки приведен на рис. 5, а для экспоненциальной периодической функции – см. далее рис. 7 и табл. 2. Обычно нагрузкам (тепловой, влажностной) приписывают постоянство значений или периодическое изменение в расчетные зимние и летние сутки.

Гармонический анализ безразмерной периодической приближенно-экспоненциальной функции

Теория и опыт указывают, что в силу инерционности процесса передача теплоты, влаги, вредности, в процессах перемешивания и др. изменение параметров воздуха близко к экспоненциальному. Выполненный для этого случая гармонический анализ [11] позволяет представить тепловую нагрузку средним значением и несколькими гармониками ее изменения. На выходе из кондиционера текущее изменение параметра (например, температуры воздуха) можно записать в виде бесконечного ряда, в котором с допустимой точностью достаточно учесть несколько первых гармоник:

$$t_{ПР}(\tau) = t_{ПР.ср} + \sum_{i=1}^{\infty} A_{t_i} \cos(\omega_i \tau + \varepsilon_i). \qquad (2)$$

Аналогично можно представить периодическое изменение температуры в помещении или у датчика рециркуляционного воздуха:

$$t_B(\tau) = t_{B.cp} + \sum_{i=1}^{\infty} A_{t_{B_i}} \cos(\omega_i \tau + \varepsilon_i + \Delta\varepsilon_i). \qquad (3)$$

Для определения искомых амплитуд первых трех гармоник разложения в ряд Фурье воспользуемся графоаналитическим методом [11]. Для этого кривые изменения параметров во времени (рис. 6) по точкам наносят на шаблон (рис. 7). По нему за время периода $\tau_П=\tau_1+\tau_2$ определяют параметры (относительные величины) $b=\tau_1/(\tau_1+\tau_2)$, $\beta_1=T_H/b\tau_n$ и $\beta_2=T_0/(1-b)\tau_n$, далее по специальной таблице 2 [11] находят относительные амплитуды гармоник (в долях от общего изменения параметра). Соотношение амплитуд первой, второй и третьей гармоник характеризует затухание колебаний на трех частотах (часть т.н. амплитудно-частотной характеристики).

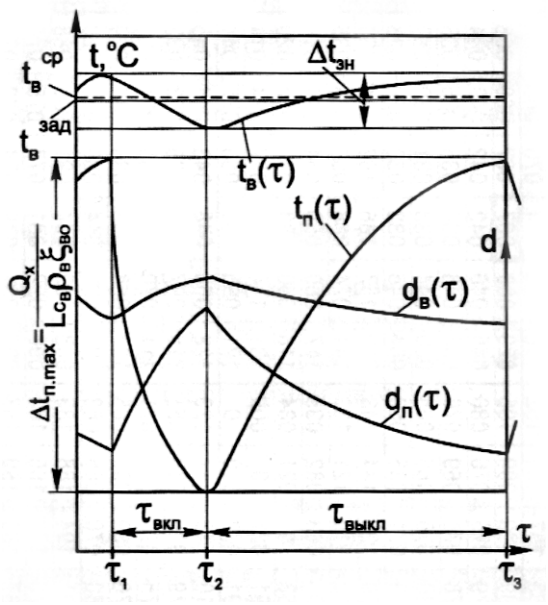


Рисунок 6. Исследуемые (типовые) кривые циклического изменения температуры и влагосодержания воздуха после кондиционера (приточного П) и рециркуляционного воздуха (в помещении В)

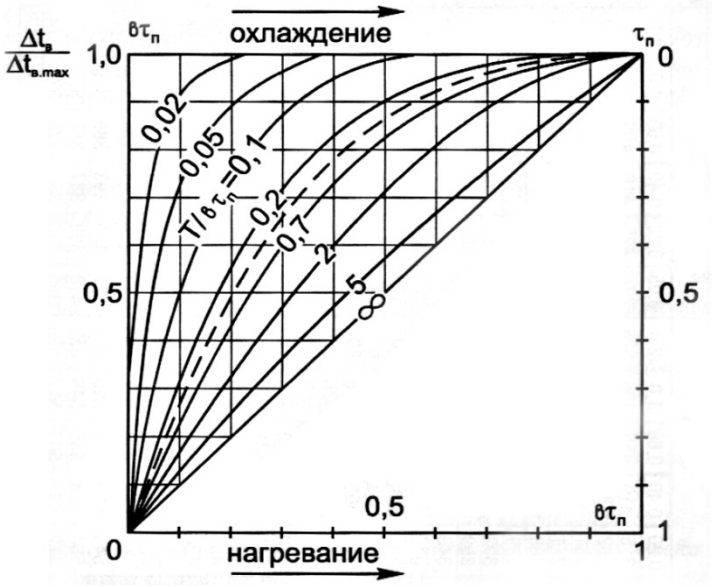


Рисунок 7. Шаблон для приближенного определения отношения постоянной времени экспоненциального переходного процесса повышения или понижения температуры к соответствующему полупериоду цикла $\beta_1=T_H/b\tau_n$ – для повышения параметра, $\beta_2=T_0/(1-b)\tau_n$ – для понижения параметра. Ключ: для нанесенных опытных точек полупериода нагрева $\beta_1=T_H/b\tau_n\approx0,5$

При изменении соотношения полупериодов колебания температуры изменяется среднее ($\Delta t_{B.cp}$) хотя бы на доли градуса, что естественно «ощущает» прецизионный объект кондиционирования (деталь, изделие), потому что это стационарное отклонение. Например, если $t_{B.max}$-$t_{B.min}$=5°С, а величина b=0,40 изменится до значения b=0,50, а β_1 и β_2 останутся теми же (см. ключ к таблице), то $A_{t_0} = \Delta t_{cp}$ изменится от 0,509 до 0,520, что в абсолютном виде будет равно: Δt_{cp}=(0,52-0,509)·5=0,05°С, что соизмеримо со статической точностью стабилизации температуры для прецизионной детали.

Таблица 2. Таблица мантисс относительных амплитуд нулевой и первых трех гармоник разложения периодических приближенно-экспоненциальных кривых изменения анализируемого параметра в ряд Фурье

		Нулевая гармоника						Первая гармоника					
b	β_1 \ β_2	0,05	0,20	0,40	0,60	1,0	2,0	0,05	0,20	0,40	0,60	1,0	2,0
0,20	0,20	201	316	410	455	496	528	297	425	418	409	399	390
	0,40	178	292	386	432	472	505	254	394	397	393	387	382
	0,60	167	281	375	420	461	493	233	380	387	385	382	378
	1,0	156	271	365	410	451	483	215	367	378	379	377	375
	2,0	148	263	357	402	443	475	200	356	372	374	374	374
0,40	0,20	353	439	509	543	579	598	509	532	792	470	450	433

	0,40	306	392	462	496	527	551	441	485	459	444	430	419
	0,60	283	369	439	473	504	528	407	461	442	431	421	413
	1,0	263	349	419	453	484	508	376	440	428	420	413	408
	2,0	247	333	403	436	467	492	352	423	417	412	408	404
0,50	0,05	500	507	596	656	685	705	630	614	563	500	450	434
	0,20	425	500	520	580	610	613	617	605	570	500	456	442
	0,40	404	480	500	565	586	608	575	565	540	485	450	436
	0,60	344	419	441	500	526	550	574	500	480	450	430	421
	1,0	316	391	412	472	500	520	450	460	450	433	420	415
	2,0	285	370	391	450	480	500	426	435	443	422	415	410
0,60	0,20	504	561	608	631	651	667	571	532	485	461	440	423
	0,40	434	490	537	561	581	597	508	492	459	442	428	417
	0,60	400	456	504	527	547	563	475	470	444	431	420	412
	1,0	369	426	473	496	516	533	444	450	430	421	413	408
	2,0	345	402	449	472	492	508	420	433	419	413	408	405
0,80	0,20	655	684	708	719	729	737	466	425	394	380	367	356
	0,40	562	590	614	625	635	643	444	418	397	387	378	372
	0,60	516	545	568	580	590	598	427	409	393	385	379	374
	1,0	476	504	528	539	549	557	410	399	387	382	377	374
	2,0	443	472	495	507	517	525	395	390	382	378	375	374
1,0	–	950	807	689	633	582	542	215	249	296	308	314	317

		Вторая гармоника						Третья гармоника					
b	β_1 \ β_2	0,05	0,20	0,40	0,60	1,0	2,0	0,05	0,20	0,40	0,60	1,0	2,0
0,20	0,20	232	216	187	179	173	169	153	102	092	091	091	091
	0,40	199	201	175	167	162	160	133	094	081	079	078	077
	0,60	183	194	170	163	158	156	123	091	077	074	073	072
	1,0	169	188	166	159	155	153	113	089	075	072	070	069
	2,0	157	183	163	157	154	152	106	088	074	070	068	068
0,40	0,20	216	105	089	093	099	105	029	068	067	067	068	068
	0,40	203	110	079	075	076	080	045	046	042	042	043	044
	0,60	194	113	078	070	069	070	053	043	036	035	035	036
	1,0	186	117	080	070	065	065	060	044	033	031	030	030
	2,0	179	120	083	071	065	063	064	046	033	030	029	028
0,50	0,05	0	033	079	126	134	143	319	167	186	192	204	239
	0,20	037	0	052	110	121	132	141	074	068	058	035	035
	0,40	085	052	0	063	082	095	117	080	059	054	044	016
	0,60	132	110	063	0	021	034	116	090	083	073	052	020
	1,0	139	121	081	021	0	009	131	114	107	097	074	014
	2,0	145	130	091	032	010	0	121	095	091	086	075	044
0,60	0,20	069	105	110	113	117	120	128	068	046	043	044	046
	0,40	097	089	079	078	080	083	115	067	042	036	033	033
	0,60	109	093	075	070	070	071	111	070	042	035	031	030
	1,0	119	099	076	069	065	065	107	068	043	035	030	029
	2,0	125	105	080	070	065	063	104	068	044	036	030	029
0,80	0,20	223	216	201	194	188	183	098	102	094	091	089	088
	0,40	192	187	175	170	166	163	096	092	081	077	075	074
	0,60	183	178	167	163	159	157	097	091	079	074	072	070
	1,0	176	173	162	158	155	154	098	091	078	073	070	068
	2,0	172	169	160	156	153	152	099	091	077	072	069	068
1,0	–	142	148	156	158	159	159	101	103	105	106	106	106

Ключ: Если температура приточного воздуха изменяется на $\Delta t = Q_{пом}/L_{пр}\rho_B c_B = 5°C$, относительный полупериод нагрева составляет b=0,40 (от времени цикла), отношения постоянной времени к полупериоду повышения температуры β_1=0,20, понижения температуры β_2=0,40, то $A_{t_0}/\Delta t = 0,509$; $A_{t_0}\cdot\Delta t = 0,509\cdot 5 = 2,55^\circ C$; $A_{t_1}/\Delta t = 0,492$; $A_{t_1} = 0,492\cdot 5 = 2,46^\circ C$; $A_{t_2}/\Delta t = 0,89$; $A_{t_2} = 0,089\cdot 5 = 0,45^\circ C$; $A_{t_3}/\Delta t = 0,067$; $A_{t_3} = 0,067\cdot 5 = 0,33^\circ C$. Для промежуточных значений b, β_1 и β_2 и их сочетаний применяется интерполяция данных между соседними значениями.

Более общий случай гармонического анализа

На практике экспериментальные кривые (например на рис.8,*б* по результатам испытания прецизионных СКВ) [12] часто не напоминают строго экспоненты, а имеют более сложную форму кривой. Покажем, к какому различию математического описания приводит представление их синусоидой или суммой гармоник.

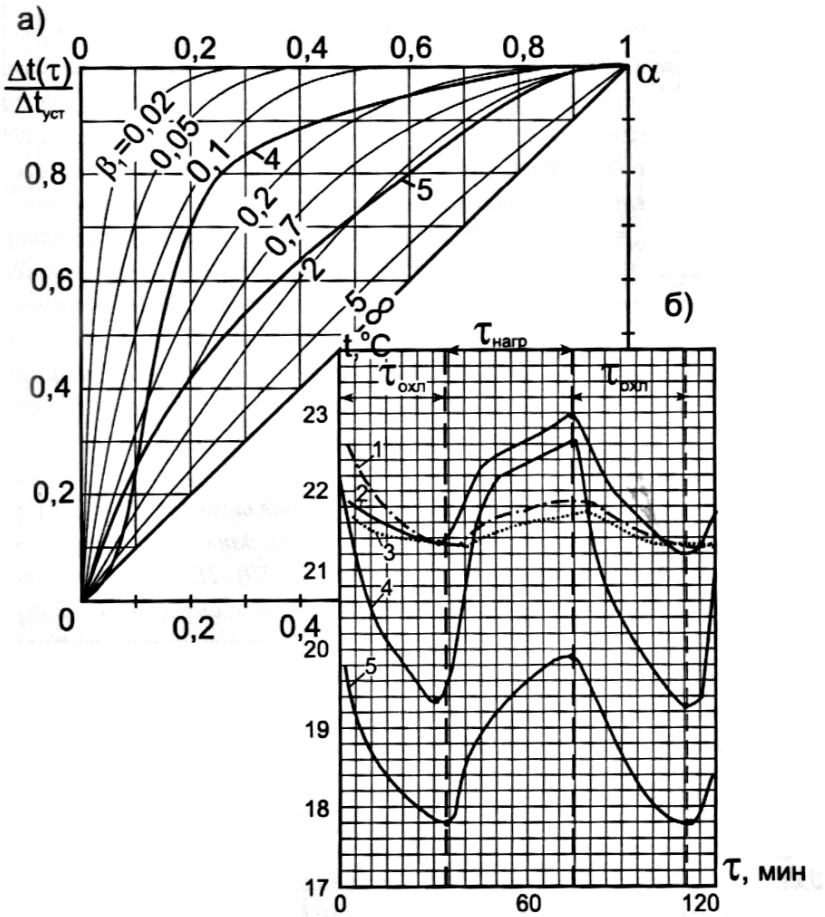


Рисунок 8. Шаблон для гармонического анализа периодических кривых с нанесением линий $t_{пр_4}$ и $t_{пр_5}$ за полупериод повышения температуры (*а*) и опытные кривые изменения температуры воздуха по мере движения его в «рубашке» (*б*), окружающей участок с прецизионным поддержанием температуры (±0,05ºС) по данным наладки ГПИ ППВ (Н.Л. Бедриковецкий, М.Х. Гиммельберг, В.В. Ловцов [12]; последний – автор монографии [13]

Поясним методику расчета температур при изменяющейся периодической тепловой нагрузке помещения примером.

Пример 2. При замерах температур воздуха «в рубашке», окружающей участок шлифовки и испытания оптических устройств, обслуживаемый прецизионной СКВ, получены результаты изменения $t_{пр}(\tau)$ в разных точках за цикл колебания с периодом $\tau_п$=1,5 ч. Эти данные представлены на рис. 8, б. Линии 4 и 5 описаны средними значениями и максимальными отклонениями следующим образом: $t_{пр_4} = 20,98 \pm 1,68$ °С, $t_{пр_5} = 18,89 \pm 1,20$ °С. Записанные здесь отклонения амплитудами называть неуместно, т.к. последние относятся к чисто гармонической (синусоидальной) кривой изменения $t_B(\tau)$. Оценить, какие амплитуды может иметь первая, вторая и третья гармоники разложения функций $t_{пр_4}(\tau)$ и $t_{пр_5}(\tau)$ в ряд Фурье и сравнить амплитуду $A_{t_{пр_1}}$ с указанными отклонениями от среднеарифметического (а не от среднего). Сравнить среднее значение и среднеарифметическое, а разницу сравнить с допустимым отклонением температуры воздуха на участке: $\Delta t_{В.доп}$=±0,05°С.

Первоначально наносим по точкам кривые повышения температуры $t_{пр_4}(\tau)$ и $t_{пр_5}(\tau)$, предварительно введя относительное время $\tau/b\tau_n$ (в данном случае полупериоды изменения температур практически равны и b=0,50). Изменение температур представлено в виде $\Delta t(\tau)/\Delta t_{уст}$, где $\Delta t_{уст}$ есть удвоенное отклонение ($2\Delta t_{пр}$), указанное в условии примера. Таким же образом наносят точки в полупериод понижения температуры. Приближенно аппроксимируя по площади кривые $t_{пр_4}$ и $t_{пр_5}$, не совпадающие с линиями экспонент, находим по графику рис. 9 и таблице 2 интересующие величины (точнее их мантиссы):

Для кривой 4: b=0,50; β_1=0,15; β_2=2,0; $A_{t_o}/\Delta t_{пр}$=0,613, $A_{t_1}/\Delta t_{пр}$=0,442, $A_{t_2}/\Delta t_{пр}$=0,132, $A_{t_3}/\Delta t_{пр}$=0,035; при $\Delta t_{пр_4}=2\cdot 1,68$=3,36°C вычисляем искомые амплитуды нулевой (среднее) и первых трех гармоник разложения, средняя $t_{пр_4(ср)}$=19,33+0,613·3,36=21,39°C, что значительно (~ на 0,4 ^{0}C) отличается от среднеарифметической (из максимальной и минимальной), особенно если сравнить с допустимым отклонением температуры воздуха на участке ($\pm$0,05ºC), то почти на порядок; $A_{t_1}=0,442\cdot 3,36$=1,49°C, $A_{t_2}=0,132\cdot 3,36$=0,44°C; $A_{t_3}=0,035\cdot 3,36$=0,12°C.

Для кривой 5: b=0,50; β_1=1,0; β_2=2,0; $A_{t_o}/\Delta t_{пр}$=0,52, $A_{t_1}/\Delta t_{пр}$=0,415, $A_{t_2}/\Delta t_{пр}$=0,009, $A_{t_3}/\Delta t_{пр}$=0,014; при $\Delta t_{пр_5}=2\cdot 1,2$=2,4°C вычисляем $t_{пр_4(ср)}=17,69+0,52\cdot 2,4$=18,94°C, что близко к среднеарифметическому (отличается на 0,05°C), $A_{t_1}=0,415\cdot 2,4$=1,0°C, остальные амплитуды второй, третьей и тем более высших гармоник не вычисляем в силу малости. При оценке значений амплитуд достаточно прежде всего принимать во внимание первую (основную), потому что она наибольшая, а затухание колебаний на основной частоте (в данном случае $\omega_1=2\pi/\tau_n=2\pi/1,5$=4,2 рад/ч) – наименьшее по сравнению с более высокими частотами. Сравнивая указанные авторами температуры Δt_4=1,68°C, Δt_5=1,20°C с амплитудами основных гармоник A_{t_4}=1,49°C, A_{t_5}=1,0°C, делаем вывод об их удовлетворительном совпадении. Для прецизионных СКВ большее значение имеет «дрейф» среднего при переменном соотношении полупериодов (b) и отличие среднеарифметической и истинной средней температур.

Вывод. Предлагаемый гармонический анализ экспонент периодического повышения и понижения параметров является достаточно общим случаем анализа, применимым для оценки колебаний и точности поддержания тех или иных параметров состояния воздушной среды, прежде всего в прецизионных технологических СКВ.

Литература

1. Богословский В. Н., Пирумов А. И., Посохин В. Н. и др Внутренние санитарно-технические устройства. В 3-х ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 1 / под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат. 1992. 319 с.
2. Баркалов Б. В., Карпис Е. Е. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях / 2-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат. 1982. 312 с.
3. Сотников А. Г. Автономные и специальные системы кондиционирования воздуха. СПб. : AT-Publiching. 2005. 240 с.
4. ГОСТ Р 50766-95. Помещения чистые. Классификация. Методы аттестации. Основные требования / Госстандарт России. М., 1995. 27 с.
5. Калинин И. С., Каракеян В. И., Личу Н. Ф. Вопросы прецизионных тепловых процессов в ЧПП / МИЭТ. М. , 1990. С. 9.
6. Никитина Л. М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М. : Энергия. 1968. 500 с.
7. Sebera D. K. Isoperma an Environmental Management Tool-Washington: The Commission on Preservation and Access. 1994.
8. Коркин В. Д. Особенности микроклимата музейных зданий и инженерных систем для его обеспечения. // Инженерные системы. 2005. №1(17). С. 26, 29–31.
9. Луговский С. И., Диденко В. Г. Нормирование параметров производственного микроклимата на хлопкоперерабатывающих прядильно-ткацких фабриках // В кн.: Кондиционирование воздуха в промышленных и общественных зданиях. НТО Стройиндустрии. Ташкент : ТашГИПРОНИИполиграф, 1970. С. 247–252.
10. Сотников А. Г. Математический и стереографический анализ интенсивности солнечной радиации и затенения светопроемов для расчета СКВ зданий // Инженерно-строительный журнал. 2010. №4 (14). С. 21–30.
11. Сотников А. Г. Гармонический анализ в СКВ при позиционном регулировании // Холодильная техника. 1979. №3. С. 39-43.
12. Бедриковецкий Н. Л., Гиммельберг М. Х., Ловцов В. В. Основные результаты исследования прецизионных СКВ // В кн.: Наладка и проектирование систем промышленной вентиляции и КВ / ПИППВ. М., 1969. С. 20–31.
13. Ловцов В. В. Прецизионные системы кондиционирования воздуха. М. : Стройиздат, 1971. 112 с.

**Анатолий Геннадиевич Сотников, Санкт-Петербург, Россия*
Тел. моб.: +7(921)347-33-92; эл. почта: asotnikov2005@yandex.ru

Определение динамических характеристик сооружений, контактирующих с водой, на примере арочной бетонной плотины Саяно-Шушенской ГЭС

К.т.н., начальник отдела расчетных обоснований сооружений Г.Л. Козинец*,
ОАО «Ленгидропроект»

Ключевые слова: гидродинамическое давление; задача Вестергарда; динамическое воздействие; присоединенная масса воды; уравнение Лапласа; принцип Даламбера; потенциал температур; собственные частоты и формы

Надежность сооружения, контактирующего с водой, в условиях возмущающих динамических воздействий в значительной мере определяется гидродинамическим давлением на напорную грань, поэтому важной задачей является адекватная оценка динамических характеристик – собственных частот сооружения [1-5].

Определение нагрузки от гидродинамического воздействия предусмотрено действующими нормами проектирования России, США и стран Евросоюза [6-8]. При этом, как правило, не принимаются во внимание такие факторы как характер колебаний и форма сооружения, а гидродинамическое давление определяется решением задачи Вестергарда о взаимодействии «жесткой» (недеформируемой) конструкции с жидкостью и основано на статической теории сейсмостойкости [9]. Решение этой задачи для «жесткой» конструкции реализовано с применением современных программных комплексов во ВНИИГ им. Веденеева [10]. В работах [11-14] данная проблема представлена для вязкоупругих систем, что в значительной мере может быть использовано для грунтовых сооружений. Однако рассматриваемая проблема представляется актуальной при анализе прочности именно гидроупругих «гибких» (деформируемых) систем и включает в себя совершенствование алгоритма поиска собственных значений сооружения с водохранилищем. Такими системы являются гидроупругие бетонные плотины и гидротехнические затворы, в которых нелинейные эффекты практически не сказываются на динамических характеристиках.

Целью работы является учет неравномерного распределения присоединенных масс воды к напорной поверхности для адекватного определения динамических характеристик деформируемого сооружения.

Результатом решения уравнений гидроупругости является анализ собственных частот и форм колебаний сложной системы, позволяющий заранее судить о ее поведении при динамических воздействиях, когда на систему начинают действовать переносные силы инерции [15], [16].

Физический смысл инерционной составляющей гидродинамического давления на сооружение в форме Ньютона представим в виде:

$$P = m_v \frac{dv}{dt} = \int_0^h \rho_0 \frac{d\varphi(x,y,z,t)}{dt}, \qquad (1)$$

где P – инерционная составляющая гидродинамического давления;
$\varphi(x,y,z,t)$ – потенциал скоростей движения воды; m_v – присоединенная масса воды.

Алгоритм решения практической инженерной задачи не должен слишком усложнять процесс получения результата, поэтому для определения присоединенной массы воды в рамках инженерной задачи, в качестве расчетной примем одну форму колебаний системы, вносящую наибольший вклад в динамическую нагрузку. Предложим метод оценки по модальному коэффициенту участия y_j [1]. При этом собственная частота сооружения в пустоте соответствует форме колебаний, при которой сумма модальных масс принимает максимальное значение от общей массы системы, участвующей в колебаниях. При действии возмущения в направлении по заданной оси (например X), коэффициент вклада y_j (j – собственной формы) определяется следующим образом:

$$\gamma_j = \frac{\{\phi_j\}^T [M] \{J_x\}}{\|\phi_j\|^2}. \qquad (2)$$

Здесь y_j коэффициент вклада с номером j-й формы; $\{\phi_j\}^T$ – трансформированный собственный вектор; $[M]$ _ матрица масс; $\{J_x\}$- вектор направления (по оси X); $\|\phi_j\|^2$ _ модуль собственного вектора.

Далее определим относительные перемещения напорной поверхности и присоединенные массы воды по выбранной j-й форме колебаний системы. Однако прямое решение задачи гидроупругости не всегда оправдано. Во-первых, схематизация системы достаточно условна, так как невозможно задать адекватный контакт напорной поверхности с водой с помощью волновых уравнений. Во-вторых, размерность решаемой задачи возрастет в несколько раз, что значительно увеличит погрешность расчета. Для решения инженерных задач наиболее приемлем способ определения присоединенных масс воды через решение задачи стационарной теплопроводности для бассейна перед сооружением. Решение основывается на аналогии уравнений для потенциала скоростей движения жидкости $\varphi(x, y, z, t)$ и поля температур $T(x, y, z, t)$. При этом снимаются все допущения по геометрической конфигурации системы и унификации форм колебаний сооружения. Изложим краткую постановку и методику решения задачи гидроупругости с учетом одной из исследуемых форм колебаний. Опираясь на имеющиеся материалы по влиянию жидкости на напряженно-деформированное состояние гидротехнических сооружений при динамических воздействиях, при формулировании задачи примем традиционные допущения: $T(x, y, z, t)$.

1. Рассмотрим малые колебания системы «сооружение–основание–водохранилище», которые описываются линеализированными уравнениями.
2. Будем считать воду однородной, несжимаемой идеальной жидкостью.
3. Примем идентичными собственные частоты сооружения в пустоте и жидкости.

Итак, воду считаем идеальной и несжимаемой жидкостью, волнообразование на свободной поверхности не учитываем. Тогда потенциал скорости движения жидкости $\varphi(x, y, z, t)$ удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\nabla^2\varphi = 0. \tag{3}$$

В сравнении с уравнением теплопроводности при отсутствии источников тепла уравнение Лапласа для потенциала температур принимает вид:

$$\nabla^2 T = 0. \tag{4}$$

Граничные условия при решении стационарной температурной задачи будут следующими: на свободной поверхности воды температура $T = 0$; на жестких стенках бассейна и в плоскости симметрии поток тепла $q = 0$; на грани, совпадающей с затвором, поток тепла q задается пропорционально исследуемой форме колебаний конструкции

$$q = \mathrm{u_o}\,(\mathrm{x,y,z}). \tag{5}$$

При q=1 получаем решение задачи Вестергарда для «жесткой» конструкции.

Основываясь на аналогии между (3) и (4), приведем гидродинамическое давление при помощи линеализированного интеграла Коши-Лагранжа через потенциал температур к виду:

$$p = \rho_в \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t}. \tag{6}$$

При учете только инерционной составляющей гидродинамического давления по принципу Даламбера:

$$p = -m_v\, \ddot{u}(t), \tag{7}$$

где m_v _ присоединенная масса воды, $\ddot{u}(t)$ _ ускорение движения сооружения.

Тогда формула для пересчета присоединенной массы для i-го элемента площадью dF_i при разделении переменных примет вид:

$$m_{i\,v} = -\rho_в \frac{T(x, y, z)\dot{\tau}}{\ddot{u}} dF_i, \tag{8}$$

где $T(x, y, z)$ - функция, зависящая только от координат, τ - функция, зависящая только от времени.

При колебаниях системы по гармоническому закону:

$$\ddot{u} = -\omega^2 u_0(x, y, z). \tag{9}$$

$$m_{i\,v} = \rho_в \frac{T(x, y, z)\dot{\tau}}{\omega^2 u_0(x, y, z)} dF_i \,. \tag{10}$$

Уравнение движения сооружения при заданных граничных условиях соответствует сопряжению напорной поверхности с бассейном при малых перемещениях и не зависит от времени. При выполнении условия $\dot{\tau} = \omega^2$ значения m_v удовлетворяют уравнению:

$$m_{i\,v} = \rho_в \frac{T_i(x_0, y, z)}{u_{i\,j}(x_0, y, z)} dF_i \,, \tag{11}$$

где $T_i(x_0, y, z)$ - температура в бассейне, в точке примыкания к i -му узлу напорной поверхности; $u_{i\,j}(x_0, y, z)$ – относительное перемещение i -го узла для j -й формы колебаний сооружения; dF_i _ площадь напорной поверхности, примыкающая к i -му узлу. Следует заметить, что при пересчете температур в точечные массы масса i -го элемента площадью dF_i увеличится на $m_{i\,v}$, при этом по формуле (11) можно учесть любую из полученных в модальном анализе форм колебаний сооружения.

Тогда сосредоточенная масса в узлах смоченной поверхности для площади F , примыкающей к i -му узлу, определится по формуле:

$$m_v = m_{iv} \cdot F \,. \tag{12}$$

При определении собственных частот сооружения в жидкости, необходимо считать, что сооружение колеблется в пустоте, но к его массе M прибавлена присоединенная масса воды M_v . С учетом влияния жидкости j -я собственная частота сооружения определяется по формуле:

$$f_{j\,ж} = \frac{f_j}{\sqrt{1 + (M_v / M_c)}} \,. \tag{13}$$

Таким образом, влияние присоединенных масс воды приводит к понижению собственных частот системы, а задачу на собственные значения для рассматриваемого сооружения с учетом взаимодействия с водой можно записать уравнением:

$$\left([K] - \omega^2 [M_c]\right)\{\vec{u}\} = 0 \,, \tag{14}$$

где $[K]$ – матрица жесткости системы;

$[M_c] = [M] + [M_v]$ – суммарная матрица массы сооружения и массы воды;

ω и $\{\vec{u}\}$ – искомые собственная частота и собственный вектор сооружения, взаимодействующего с водой.

Решая уравнение (14) методом итерации подпространств, определим собственные частоты и формы колебаний сооружения с учетом присоединенных масс воды, что позволит оценить надежность системы при вероятном возмущающем динамическом воздействии. Для примера, с помощью изложенного алгоритма выполнено распределение присоединенных масс воды и исследованы собственные колебания арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС в пустоте и жидкости, см. рис. 1 и 2.

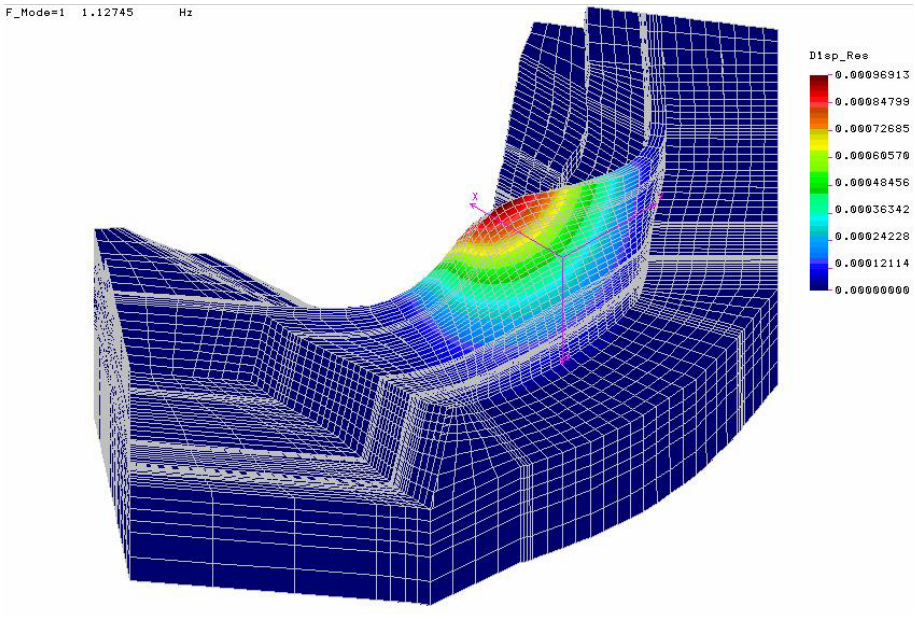


Рисунок 1. Первая форма колебаний плотины СШГЭС в пустоте – «сухой» плотины (частота – $\nu = 1{,}127$ Гц)

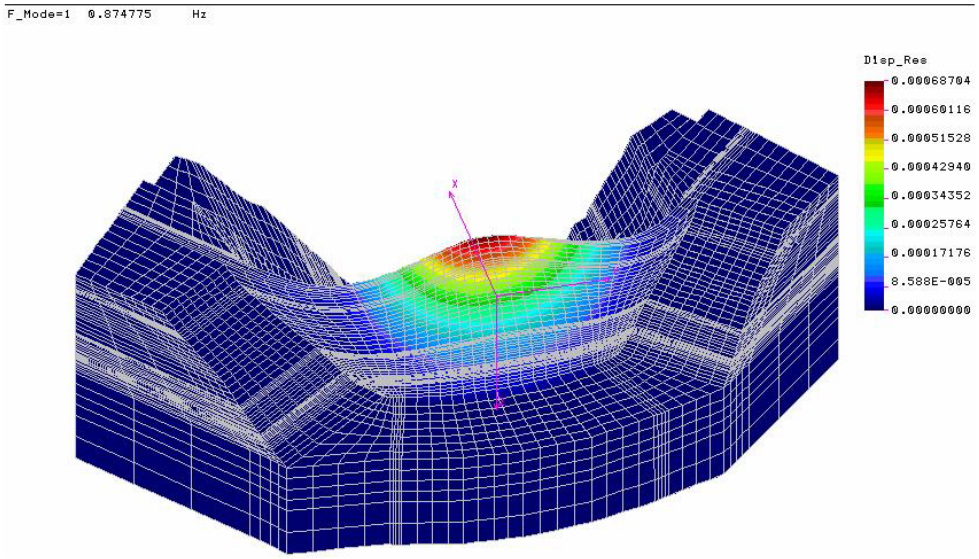


Рисунок 2. Первая форма колебаний плотины СШГЭС в жидкости – решение задачи гидроупругости при колебаниях «гибкой» плотины (частота $\nu = 0{,}875$ Гц)

Анализ результатов

Учет взаимодействия плотины с водой приводит к изменению форм колебаний плотины, уменьшению частот собственных колебаний *ν* и увеличению массы системы M на присоединенной массы воды M_ν . Для плотины Саяно-Шушенской ГЭС получены следующие результаты:

- для «сухой» плотины в пустоте: первая собственная частота $\nu = 1{,}127$ Гц, масса присоединенной воды $M_\nu = 0$ т;
- для «жесткой» плотины в воде: первая собственная частота $\nu = 0{,}83$ Гц, масса присоединенной воды $M_\nu = 2{,}046 \times 10^7$ т;
- для «гибкой» плотины в воде: первая собственная частота $\nu = 0{,}875$ Гц, масса присоединенной воды $M_\nu = 1{,}846 \times 10^7$ т, при этом:

1) первая собственная частота математической модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС без учета присоединенных масс воды составляет 1,127 Гц, что соответствует тестовым динамическим испытаниям сооружения при отметке УВБ 540 м с применением дебалансной машины (в соответствии с отчетом ООО ТРИЭС о натурных исследованиях динамических характеристик плотины Саяно-Шушенской ГЭС, 1995 г.), по которым частота оказалась равной 1.125 Гц;
2) распределение присоединенных масс воды m_v в створе плотины Саяно-Шушенской ГЭС с учетом форм колебаний получено неравномерным по ширине створа; в середине плотины массы воды на 20% больше масс, вычисленных для «жесткой» плотины, а у берегов на 20%-25% меньше (рис. 3-6).
3) первая собственная частота плотины Саяно-Шушенской ГЭС с учетом неравномерного распределения присоединенных масс воды составляет 0,875 Гц.

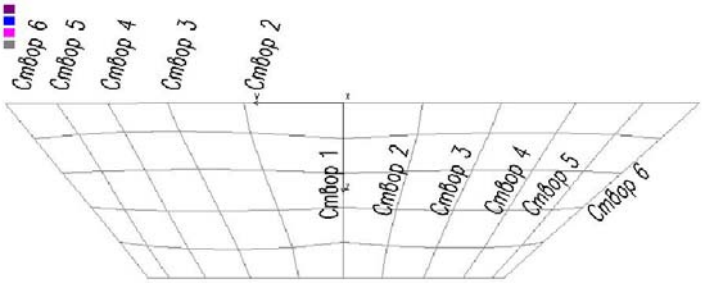


Рисунок 3. Схема расположения створов плотины Саяно-Шушенской ГЭС

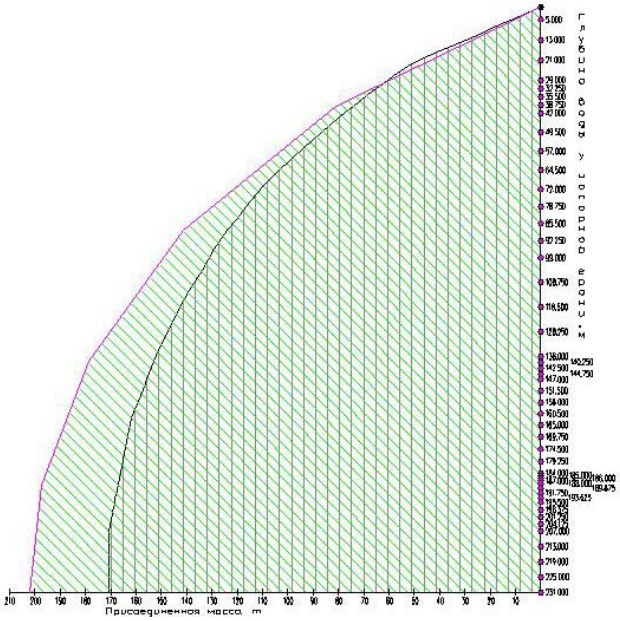


Рисунок 4. Эпюра распределения точечных масс в створе 1 и 2

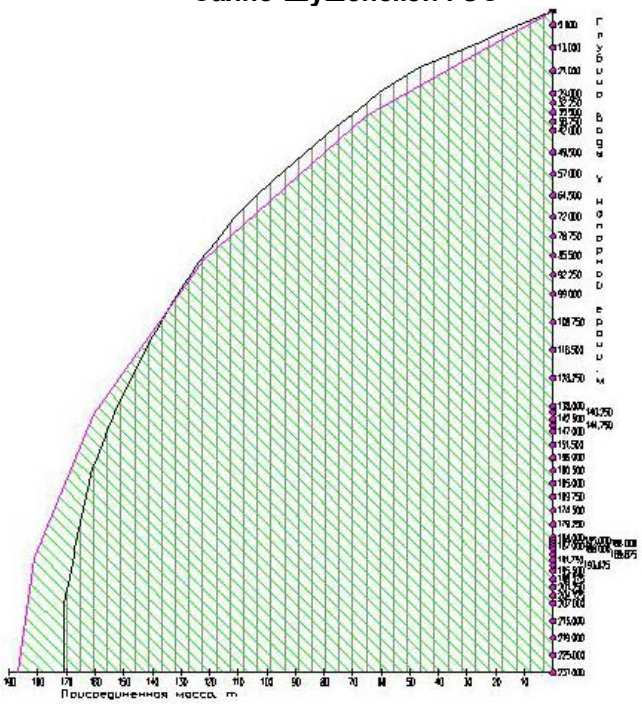


Рисунок 5. Эпюра распределения точечных масс в створе 3 и 4

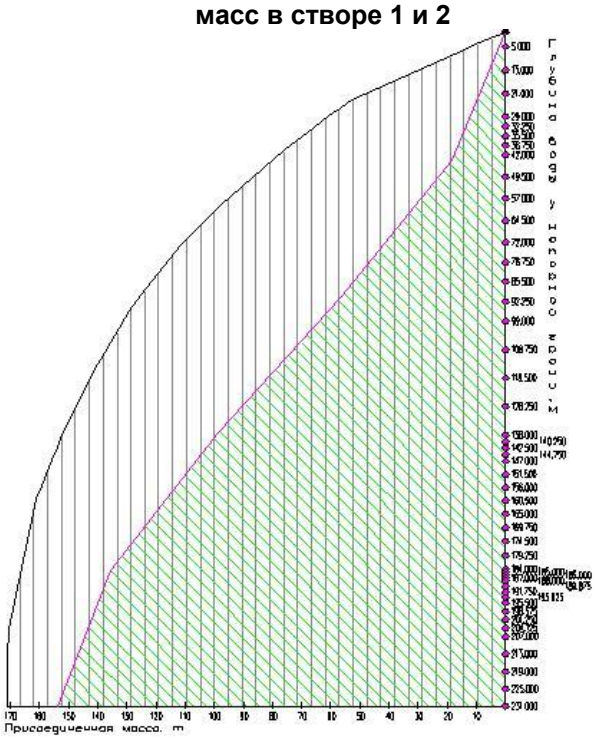


Рисунок 6. Эпюра распределения точечных масс в створе 5 и 6

Выводы

1. В работе предложен новый способ определения присоединенных масс воды позволяющий учитывать неравномерное распределение масс воды на напорной поверхности любого профиля.
2. На примере арочной плотины Саяно- Шушенской ГЭС показано численное соответствие частот для построенной пространственной модели плотина-основание с частотами фактического сооружения, построены кривые присоединенных масс воды, определены собственные частоты плотины без учета и с учетом влияния воды.
3. Результаты работы используются в ОАО «Ленгидропроект» при оценке прочности бетонных плотин и гидротехнических затворов при сейсмических воздействиях [17].

Литература

1. Бирбраер А. Н., Шульман С. Г. Оценка сейсмостойкости сооружений и оборудования АЭС в рамках нормативной методики // Энергетическое строительство.1987. №1. С. 19-22.
2. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб. : Наука, 1998. 249 с.
3. Кульмач П. П. Гидродинамика гидротехнических сооружений (Основные плоские задачи). М. : Изд-во АН СССР. 1963. 190 с.
4. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М. : Наука, 1988, 712 с.
5. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М. : Машиностроение, 1985. 472 с.
6. American National Standard. Earthquake Instrumentation Criteria for Nuclear Power Plants // ANSI. 1974. No. 18.5. P. 398 p.
7. DIN 19704-1, DIN 19704-2, DIN19704-03. Stahlwasserbauten- Teil: Berechnungsgrundlagen: 1998-05.
8. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Analysis of Safety-Related Nuclear Structures // ASCE Standard, Sept. 1986. P. 120.
9. Westergaardt H. M. Pressures on Dams during Earthquakes // Proc. ASCE. 1931. Vol. 57, No. 9. P.1303-1318.
10. Скворцова А. Е., Судакова В. Н. Цейтлин Б. В. Расчет сейсмических колебаний конструкций, взаимодействующих с жидкостью // Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения : Труды 4-й Международной конференции. СПб. : Нестор, 2001. С. 274–277.
11. Абдикаримов Р. А., Эшматов Х., Бобаназаров Ш. П., Ходжаев Д. А., Эшматов Б. Х. Математическое моделирование и расчет гидротехнических сооружений типа плотины-пластины с учетом сейсмической нагрузки и гидродинамического давления воды // Инженерно-строительный журнал. 2011. №3(21). С. 59-70.
12. Абдикаримов Р. А., Жгутов В. М. Математические модели задач нелинейной динамики вязкоупругих изотропных пластин и оболочек гладко-переменной толщины (асимметричные случаи) // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8(18). С. 47-55.
13. Абдикаримов Р. А., Жгутов В. М. Математические модели задач нелинейной динамики вязкоупругих ортотропных пластин и оболочек переменной толщины // Инженерно-строительный журнал. 2010. №6(16). С. 38-47.
14. Гиргидов А. А. Гибридное моделирование в проектировании гидротехнических сооружений и FLOW-3D® как средство его реализации // Инженерно-строительный журнал. 2011. №3(21). С. 21-27.
15. Шейнин И. С. Колебания конструкций гидросооружений в жидкости : Справочное пособие по динамике гидросооружений. Ч. 1. Л. : Энергия, 1967. 310 с.
16. Шульман С. Г. Расчеты сейсмостойкости гидросооружений с учетом влияния водной среды. Л. : Энергия, 1976. 336 с.
17. Козинец Г. Л. Проблема учета присоединенных масс воды в расчетах затворов на сейсмостойкость // XXIX Неделя науки СПбГПУ : Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч.1 . СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. 2006. С. 145.

** Галина Леонидовна Козинец, Санкт-Петербург, Россия*
Тел. раб.: +7(812)395-23-79; эл. почта: galina4410@yandex.ru

Изменение диссипации энергии при переходе от ламинарного режима к турбулентному

Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой А.Д. Гиргидов*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: диссипация энергии; ламинарный и турбулентный потоки; обтекание пластины; течение в цилиндрической трубе

Связи диссипации механической энергии в потоке несжимаемой жидкости с потерями напора в случае течения в трубах или с лобовым сопротивлением движению тела в жидкой среде в литературе (см. например [1-5]) уделяется недостаточное внимание. Вместе с тем эта связь может иметь существенное практическое значение и позволяет получить нетривиальные результаты [6].

Вопрос с диссипации энергии в гидромеханике часто рассматривается в связи с теоремой Гельмгольца о минимуме диссипации [1]. При этом на границах выделенного контрольного объема задаётся скорость жидкости, т.е. требуется соблюдение кинематических условий. В некоторых задачах, например при исследовании перехода ламинарного режима движения в турбулентный, может оказаться целесообразным выяснение особенностей диссипации механической энергии при заданных динамических условиях (силы, напряжений) на границах потока. Рассмотрим два примера такой постановки вопроса.

Обтекание пластины, двигающейся в покоящейся жидкости со скоростью V с постоянным тяговым усилием F (на единицу ширины пластины):

$$F = c\frac{\rho V^2}{2}, \tag{1}$$

где ρ – плотность жидкости; c – коэффициент сопротивления.

При ламинарном режиме [2]:

$$c_l = 1{,}328\, Re_L^{-1/2}, \tag{2}$$

где $Re_L = \frac{VL}{\nu}$; L – длина пластины (вдоль потока); ν – кинематический коэффициент вязкости.

При турбулентном режиме [1]:

$$c_t = 0{,}0307\, Re_L^{-1/7}. \tag{3}$$

Если ламинарный режим перешел в турбулентный, то коэффициент сопротивления возрастет, а скорость V_l, соответствующая ламинарному режиму, при постоянной тяге уменьшится до значения скорости V_t, соответствующей турбулентному режиму. Чтобы оценить значение V_l/V_t, приравняем значения тяги при двух режимах:

$$c_l\frac{\rho V_l^2}{2} = c_t\frac{\rho V_t^2}{2}. \tag{4}$$

Используя (2) и (3), из (4) имеем:

$$\frac{V_l}{V_t} = 0{,}231\left(\frac{V_l L}{\nu}\right)^{0{,}385}.$$

Для значения $\frac{V_l L}{\nu} = 10^6$ получим:

$$V_l = 4{,}72 V_t.$$

Таким образом, при переходе ламинарного режима в турбулентный в случае постоянной тяги скорость пластины уменьшается в несколько раз, и следовательно, диссипация энергии за единицу времени уменьшится во столько же раз. Вместе с тем работа, необходимая для перемещения пластины на фиксированное расстояние, при обоих режимах будет одинаковой.

Течение Гагена–Пуазейля

Рассмотрим с этих же позиций течение Гагена-Пуазейля в цилиндрической трубе диаметром D, соединяющей два резервуара. Свободные поверхности жидкости в резервуарах поддерживаются на постоянном уровне (например, с помощью устройства холостых сливов). Давление на свободные поверхности одинаково, а разность уровней жидкости в резервуарах равна Z. Во всех точках контрольной поверхности, ограничивающих объём жидкости в резервуарах и трубе, скорость жидкости равна нулю. Увеличивая длину трубы l, можно добиться того, что потери энергии на вход в трубу и на выход из трубы в резервуар, а также длина начального участка станут пренебрежимо малы. При этом в трубе будет иметь место продольно однородное движение, а потери напора по длине h_l, вычисленные по формуле Вейсбаха-Дарси, будут равны Z:

$$h_l = \lambda \frac{l}{D} \frac{\mathrm{v}^2}{2g}, \tag{5}$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; v – средняя (объемная) скорость жидкости в трубе.

Согласно уравнению Бернулли для потока вязкой жидкости (выражающему закон изменения кинетической энергии [2]) диссипация энергии внутри трубы за единицу времени:

$$\int_{\forall} \rho \varepsilon \, \mathrm{d}\forall = \rho g Q Z = \rho g \frac{\pi D^2}{4} \mathrm{v} Z, \tag{6}$$

где $\forall$ – объем трубы; Q – расход жидкости.

Обратим внимание на то, что при сделанных предположениях продольный градиент давления в трубе постоянен и равен:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\rho g Z}{l} = \lambda \frac{\rho \mathrm{v}^2}{2D},$$

где x – продольная координата. Это означает, что касательное напряжение на стенке трубы также постоянно на всей внутренней поверхности трубы:

$$\tau_0 = \frac{\rho g D Z}{4l}. \tag{7}$$

Таким образом, так и в случае пластины, на поток в трубе действует постоянная сила:

$$F = \tau_0 \pi D l = \frac{\pi D^2}{4} \rho g Z. \tag{8}$$

На первый взгляд, на поверхности объема жидкости в резервуарах и трубе скорость жидкости равна нулю, и следовательно, выполняются граничные условия теоремы Гельмгольца о минимуме диссипации. Однако следует обратить внимание, что равенство нулю скорости жидкости на свободной поверхности в резервуарах выполняется лишь асимптотически (при неограниченном увеличении размера резервуара). При этом отношение бесконечно малых скоростей при ламинарном и турбулентном режимах остается постоянным и равным отношению средних скоростей при этих режимах. Поэтому, хотя для течения Гагена-Пуазеля имеет место минимум диссипации [7], в рассматриваемом примере течения в трубе, соединяющей два резервуара, условия теоремы Гельмгольца не соблюдаются.

Как показано теоретически в [8,9], (см. также [10,11,12]), средняя скорость в трубе v_t при турбулентном режиме меньше, чем скорость v_l при ламинарном. Это следует также из экспериментального графика Никурадзе [1]. Если при одном и том же градиенте давления могут существовать и ламинарный и турбулентный режимы, то имеем равенство:

$$\lambda_l \frac{l}{D}\frac{\rho \mathrm{v}_l^{\,2}}{2} = \lambda_t \frac{l}{D}\frac{\rho \mathrm{v}_t^2}{2}, \qquad (9)$$

где λ_l и λ_t – коэффициенты гидравлического трения при ламинарном и турбулентном режимах соответственно. Из графика Никурадзе следует, что во всём диапазоне чисел Рейнольдса $Re = \frac{\mathrm{v}D}{\nu}$, где ν – кинематический коэффициент вязкости, в котором может существовать турбулентный режим, $\lambda_t > \lambda_l$. При этом из (9) следует, что $\mathrm{v}_l > \mathrm{v}_t$, и согласно (5) диссипация энергии при турбулентном режиме в контрольном объеме меньше, чем при ламинарном.

Чтобы оценить, насколько уменьшается диссипация энергии, предположим, что при турбулентном режиме труба гидравлически гладкая, так что

$$\lambda_t = \frac{0{,}3164}{Re_t^{0{,}25}},$$

а при ламинарном $\lambda_l = \frac{64}{Re_l}$. Подставляя эти выражения в (9), получим:

$$\frac{64}{Re_l}\frac{l}{D}\frac{\rho \mathrm{v}_l^{\,2}}{2} = \frac{0{,}3164}{Re_t^{0{,}25}}\frac{l}{D}\frac{\rho \mathrm{v}_t^2}{2}.$$

Из этого равенства следует:

$$\frac{\mathrm{v}_l}{\mathrm{v}_t} = 0{,}0494\, Re_t^{0{,}75}. \qquad (10)$$

Приняв в качестве минимального числа Рейнольдса, при котором реализуется развитый турбулентный режим, Re =4000, получим $\mathrm{v}_l = 2{,}48\,\mathrm{v}_t$.

Таким образом, в соответствии с (6) диссипация энергии при турбулентном режиме в 2,5 раза меньше, чем при ламинарном. Отметим, что при соответствующем расчетным условиям значении $Re \cong 10^4$ ламинарный режим в трубе может существовать: если создать соответствующие условия, то ламинарное движение можно наблюдать при Re =4 x 10^4 [8].

Представляется полезным отметить то, что граничные условия для цилиндрической трубы неограниченной длины без указания на их присоединения к резервуарам в полярной системе координат (x, r), где r – расстояние от оси трубы, имеют следующий вид:

при $r = \frac{D}{2}$ имеем $u_x = 0$; $\tau_0 = \mathrm{const}$, где u_x – продольная скорость жидкости.

Таким образом, на поверхности цилиндра для идентификации потоков должны быть заданы скорость (равная нулю) и (в соответствии с законом Ньютона для вязких напряжений) её нормальная производная $\frac{\partial u_x}{\partial r}$, которая и определяет среднюю скорость потока:

$$\mathrm{v} = \sqrt{\frac{8}{\lambda}\nu\frac{\partial u_x}{\partial r}}. \qquad (11)$$

Задание на поверхности трубопровода двух кинематических условий равносильно принятию постоянного значения силы F, действующей со стороны трубы на поток.

Приведенные примеры демонстрируют следующее: если сила, действующая со стороны твердых границ на поток жидкости, постоянна, то при потере устойчивости ламинарного потока и переходе к турбулентному режиму возникает поле скорости, уменьшающее диссипацию механической энергии в несколько (в два и более) раз по сравнению с ламинарным режимом.

Литература

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1978. 736 с.
2. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с.
3. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М. : Мир, 1973. 758 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. IV, Гидродинамика. М. : Наука, 1986. 736 с.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1963. 742 с.
6. Гиргидов А. Д. О лобовом сопротивлении движению цилиндра // Инженерно-строительный журнал. 2011. №1. С. 9-11.
7. Гиргидов А. Д. О диссипации энергии при движении несжимаемой жидкости // ДАН. 2009. Том 425, №3. С. 1-4.
8. Thomas T. Y. Qualitative analysis of the flow of fluids in pipes // Amer. J. Math. 1942. Vol. 64. P. 754.
9. Джозеф Д. Устойчивость движений жидкости. М. : Мир, 1981. 640с.
10. Busse F. H. Bounds on the transport of mass and momentum by turbulent flow between parallel plates // ZAMP. 1969. Vol. 20. Pp. 1-14.
11. Серрин Дж. Математические основы классической механики жидкости. М. : Изд-во иностр. лит., 1963. 256 с.
12. Joseph D. D. Response curves for plane Poiseuille flow // Advances in applied mechanics. 1974. Vol. 14. Pp. 241–278.

**Артур Давидович Гиргидов, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)552-64-01; эл. почта: hydraulika@cef.spbstu.ru

некоммерческое партнерство

Региональное объединение

В рамках II Всероссийской научно-практической конференции «Саморегулирование в строительном комплексе: повседневная практика и законодательство»

14 сентября 2011, Санкт-Петербург

Тематическая секция

Изменения в законодательстве, касающиеся экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий: проблемы и перспективы

Организатор - НП «Региональное объединение»

В программе обсуждения:
Проблемы и перспективы развития института негосударственной экспертизы
Ценообразование на услуги по проведению экспертизы
Новые требования к подготовке, переподготовке и аттестации кадров

Место проведения – конференц-центр гостиницы «Парк Инн Пулковская»
Предварительная регистрация обязательна:
(812) 277-1788, 577-1767, e-mail: lb@np-ro.ru, Людмила Белых

Экономическая эффективность энергосберегающих мероприятий

Аспирант О.В. Аверьянова*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: кондиционирование; отопление; тепловой насос; водяная петля с тепловыми насосами; альтернативные источники энергии; низкопотенциальные источники тепла; коэффициент преобразования теплоты; чистый дисконтированный доход

Решение задач энергосбережения и повышения энергоэффективности – одно из приоритетных направлений развития Российской Федерации. Поиск и реализация решений, которые позволят значительно экономить энергетические ресурсы, является наиболее актуальной задачей на сегодняшний момент в соответствии с «Энергетической стратегией России на период до 2030 года» и Федеральным законом «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» от 23 ноября 2009 года № 261 [1].

В предыдущих публикациях [2-7] нами была показана техническая реализуемость мероприятий по повышению энергоэффективности систем поддержания оптимальных параметров микроклимата зданий офисного назначения путем применения кольцевой водяной системы с тепловыми насосами (она же WLHPS - water loop heat pump system). Многие здания имеют светопрозрачные проемы на разных фасадах, получающие различные количества солнечной радиации в течение года. Вследствие этого в одних помещениях начинают преобладать теплопритоки, и для поддержания оптимальных климатических параметров в них требуется охлаждение помещения, в то время как в других помещениях потребность в отоплении остается. Объединение в единую систему дает возможность предусмотреть утилизацию теплоты удаляемого воздуха, а также утилизацию тепла других источников низкопотенциальной теплоты, например, хозяйственно-бытовых или производственных стоков.

В настоящее время использование тепловых насосов в системах теплоснабжения и отопления рассмотрены достаточно широко. Васильевым Г.Н с участием Хрустачева Л.В., Розина А.Г., Абуева И.М., Горнова В.Ф., Орлова В.О., Воробьева Н.В. было разработано «Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии» [8], а также велись исследования энергоэффективного экспериментального жилого дома [9]. Дацюк Т.А., Полушкин В.И., Васильев В.Ф. занимаются разработкой обеспечения энергоэффективности зданий, в том числе и при помощи усовершенствованных систем теплоснабжения и отопления с применением тепловых насосов [10, 11]. Повышению эффективности работы теплового насоса в системах теплоснабжения за счет модернизации конденсатора посвящены работы Петракова Г.Н. [12].

За рубежом кольцевые водяные системы с тепловыми насосами (WLHPS) начали применяться с 1960 года. Работы по улучшению конструкции водяной петли в таких системах проводил Joseph A. Pietsch в 1980-1990 гг. Также среди зарубежных исследователей стоит отметить работы R.H. Howell, J.H. Zaidi, E.A. Kush, W.S. Cooper, H.I. Henderson, S.W. Carlson, M.K. Khattar. Большой объем работ проведен на территории КНР и Южной Кореи. Наиболее значимые принадлежат Zhiwei Lian, S.W. Lang, W. Xu, T.S. Feng, F. Wang, Z.L. Ma, Y. Cao, Y.Q. Lu. Они занимались моделированием и анализом WLHPS. M. Zaheer-Uddin и J.C.Y. Wang разрабатывали функциональные схемы автоматического регулирования кольцевых водяных систем с тепловыми насосами [13,14,15].

В настоящей статье излагается подход к оценке экономической эффективности таких инженерных систем.

Подход демонстрируется на примере здания офисного назначения, типовой план этажа, фасад и разрез которого представлены на рис. 1-3. Общая высота здания 13,5 м, высота технического этажа (подвала) 2,8 м, высота типового этажа 3 м. Здание обращено главным фасадом на юго-восток. Конструктивная схема здания – монолитный железобетонный каркас. Покрытие здания выполнено в виде монолитной железобетонной плиты, утепленной минераловатными плитами. Светопрозрачные заполнения (окна, витражи) выполнены из переплетов из алюминиевых сплавов с заполнением двухкамерными стеклопакетами. Общая площадь здания 1900 м^2. Площадь помещений, в которых требуется поддержание температурных параметров, составляет 1100м^2. Площадь остекления – 450 м^2 при площади наружных ограждений 1065 м^2. Количество сотрудников, постоянно находящихся на рабочих местах, в этом здании составляет 170 чел. Воздухообмен принимается из расчета 60 м^3 на 1 человека.

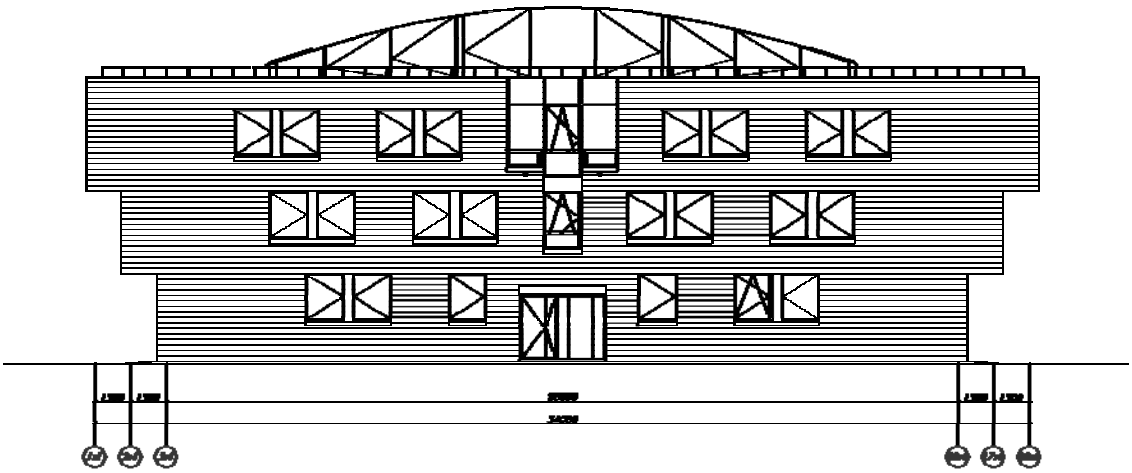


Рисунок 1. Фасад здания

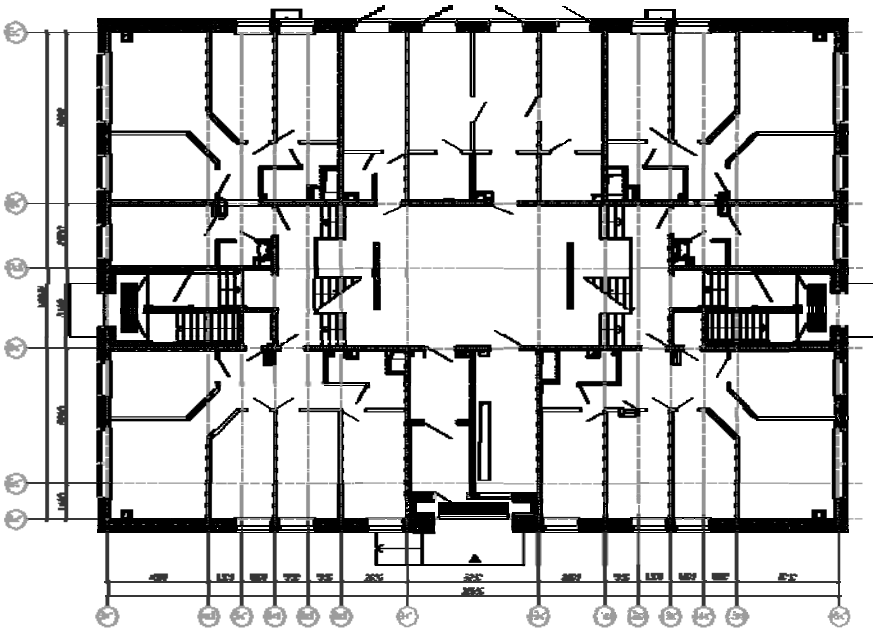


Рисунок 2. План этажа

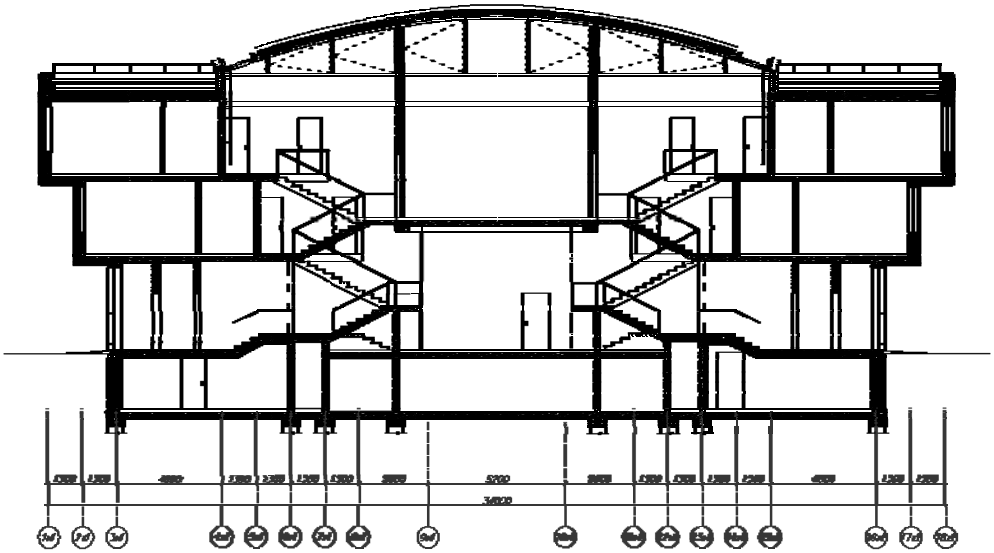


Рисунок 3. Разрез здания

Проект включает решения по кондиционированию и отоплению, а также электроснабжению в части подключения к электросетям. Для достижения заданных параметров внутреннего воздуха в помещение подается приточный воздух определенного состояния и в определенном количестве и вода, несущая тепло или холод. Такая схема предполагает независимую обработку рециркуляционного воздуха в местном агрегате и наружного воздуха в центральном кондиционере. Для этого в теплообменнике местного агрегата охлаждается или нагревается в зависимости от периода года рециркуляционный (внутренний) воздух. Приточный воздух в размере минимально необходимого расхода наружного воздуха обрабатывается в ЦК и поступает в помещение через воздухораспределительные устройства. Смешение двух потоков происходит непосредственно в самом помещении. Поддержание температуры в каждом помещении осуществляется при помощи системы управления, которая в соответствии с setpoint (уставкой) посылает сигналы на исполнительные механизмы оборудования.

Первый вариант (далее вариант №1) представляет собой базовый, основанный на широко применяемых и отработанных схемных решениях по вентиляции и кондиционированию при помощи фанкойлов, установленных в качестве местных агрегатов в обслуживаемых помещениях, теплоснабжению здания от центральных тепловых сетей, электроснабжению с однотарифным учетом электроэнергии.

Второй вариант (далее вариант №2) системы по поддержанию оптимальных параметров микроклимата должен быть выполнен на базе местно-центральной системы с тепловыми насосами, работающими в едином водяном кольцевом контуре в качестве местных агрегатов, устанавливаемых в каждом обслуживаемом помещении.

Такое комплексное решение позволяет снизить энергопотребление инженерными системами здания. Оно реализует в единой системе функции отопления, охлаждения, горячего водоснабжения, объединяет одним контуром источники теплоты и холода в здании.

Теплоснабжение здания должно быть выполнено при помощи теплонасосной установки, использующей теплоту грунта в качестве низкопотенциального источника тепла. Для уменьшения затрат на электроэнергию должны быть предусмотрены накопители (аккумулирующие емкости) для теплоносителя. Принципиальная схема представлена на рис. 4. Решения по электроснабжению с двухтарифным учетом электроэнергии.

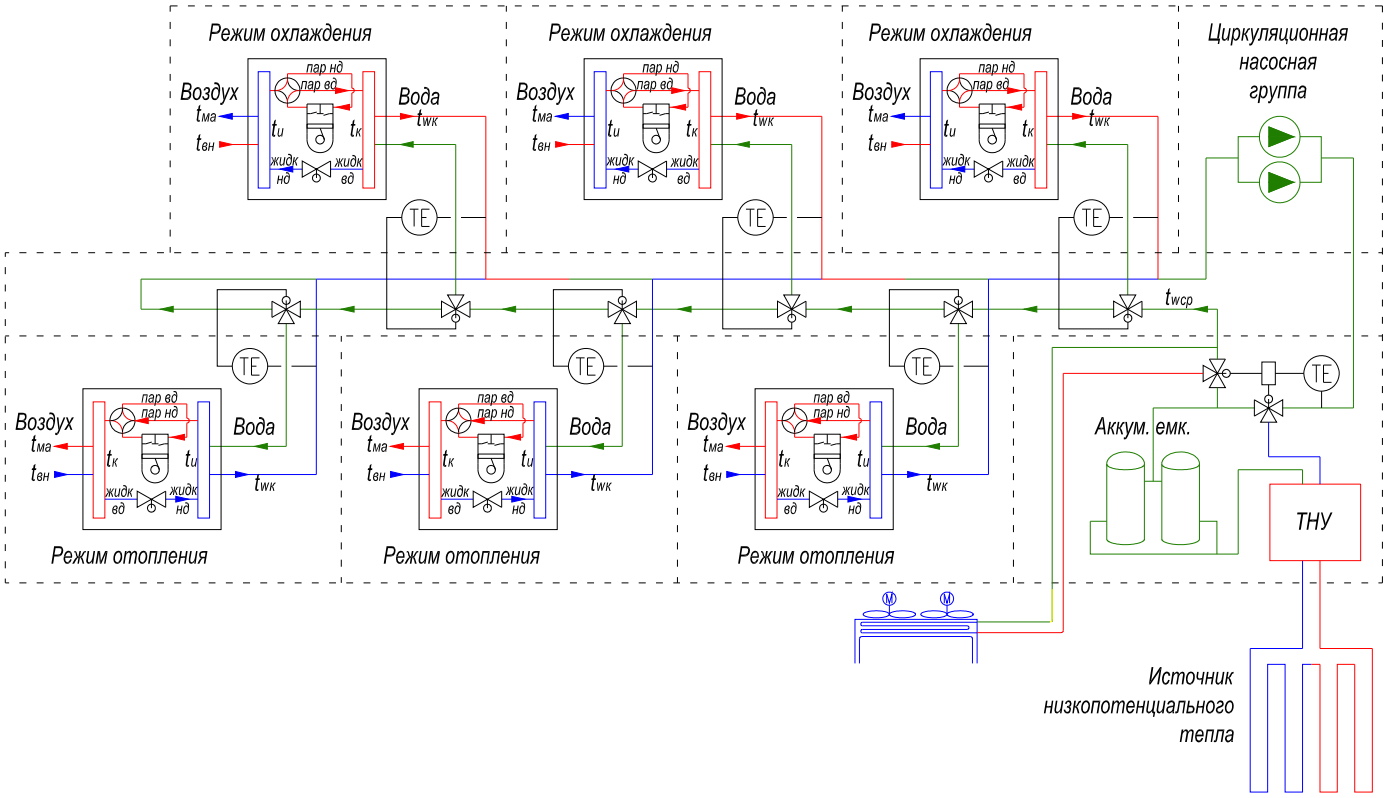


Рисунок 4. Принципиальная схема системы тепло- и холодоснабжения здания

Продолжительность строительной стадии по обоим проектам одинакова и составляет 1 год. Предполагаемая продолжительность стадии функционирования до первого капитального ремонта основных узлов 6 лет. Необходимо рассчитать все издержки для каждой из альтернатив, дисконтировать (привести к настоящему моменту) и выбрать по наименьшим затратам лучший вариант.

Сравнение различных инвестиционных проектов и выбор лучшего будем проводить с использованием следующих показателей:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД) или интегральный эффект;
- индекс доходности (ИД).

Норма дисконта Е приравнивается к ставке рефинансирования с учетом темпа инфляции и составит:

$$E = \frac{1 + E_{реф}}{1 + i} - 1,$$

где $E_{реф}$ - ставка рефинансирования Центробанка РФ;

i – темп инфляции.

$$ЧДД = \sum_{t=0}^{T} (R_t - З_t^+) \frac{1}{(1+E)^t} - K,$$

где R_t - результаты, достигаемые на t-м шаге;

$З_t^+$ - затраты на t-м шаге при условии, что в них не входят капиталовложения;

Т – горизонт расчета, равный номеру шага расчета;

$\frac{1}{(1+E)^t}$ - коэффициент дисконтирования;

$(R_t - З_t^+)$ - эффект, достигаемый на t-м шаге;

Е – норма дисконта (в относительных единицах);

К – сумма дисконтированных капиталовложений, определяемая по формуле:

$$K = \sum_{t=0}^{T} K_t \frac{1}{(1+E)^t}.$$

Индекс доходности (ИД) представляет собой отношение суммы приведенных эффектов к величине капиталовложений:

$$ИД = \frac{1}{K} \sum_{t=0}^{T} (R_t - З_t^+) \frac{1}{(1+E)^t}.$$

Он строится из тех же элементов и его значение связано со значением ЧДД: если ЧДД положителен, то ИД > 1, и наоборот. Если ИД > 1, то проект эффективен; при ИД < 1 проект неэффективен.

Количество денежных средств, которое будет израсходовано на приобретение и реализацию оборудования для проекта, представлено в табл. 1.

Таблица 1. Спецификация приобретаемого оборудования

Статья затрат (капитальные вложения)	Вариант №1 (фанкойлы)		Вариант №2 (WLHPS)	
	Количество	Стоимость, руб.	Количество	Стоимость, руб.
Основное оборудование	Фанкойлы серии 42N (Carrier) – 67 шт./430 евро/шт.	1 152 400	Тепловой насос Aquazone 50 KQE 007-019 (Carrier) – 67 шт/1800 евро/шт.	4 824 000
Насосное оборудование, руб.	Насос для контура «чиллер–фанкойл» и контура «тепл.сеть–фанкойл» серии TR(GRUNDFOSS) 175 595 руб./шт.	351 190	Насос для контура WLHPS – серии TR(GRUNDFOSS) 175 595 руб./шт.	175 595
Оборудование для теплоснабжения	-	-	Тепловой насос NIBE Модель 23кВт/12715 евро/шт. и 17кВт/15905 евро/шт.	1 144800
Оборудование для холодоснабжения	Холодильная машина модель 30RB182(Carrier) – 1 шт. / 96600 евро/шт.	3 864 000	Посредством оборудования для теплоснабжения	-
Подключение к электросетям (из расчета 10 000руб. за 1кВт	Необходимая мощность 153 кВт	1 530 000	Необходимая мощность 180 кВт	1 800 000
Всего:		**6 897 590**		**7 944 395**

Эксплуатационные затраты в течение года для двух вариантов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Потребляемая энергия и эксплуатационные затраты

Статья затрат	Вариант №1 (фанкойлы)	Вариант №2 (WLHPS)	Тариф	
Потребляемая тепловая энергия, кВт	107,98	0	1300	руб/1Гкал
Электропотребление чиллера или теплового насоса NIBE, кВт*ч	26 294,38013	11 172,2 (производство тепла) +857,52 (производство холода) (день) +9,2 (производство тепла) (ночь) *Для экономии затрат тепло или холод будет вырабатываться в ночной зоне*	Одноставочный тариф 2,80 Дневная зона 2,81 Ночная зона 1,71	руб/1кВт*ч
Электропотребление насосного оборудования, кВт*ч	18 145,02	10 740 (день) +5 356(ночь)	Одноставочный тариф 2,80 Дневная зона 2,81 Ночная зона 1,71	руб/1кВт*ч
Электропотребление приводов компрессоров WLHPS, кВт*ч	0	20 494,569	Одноставочный тариф 2,80 Дневная зона 2,81 Ночная зона 1,71	руб/1кВт*ч
Общее электропотребление, кВт*ч	44 439,40	48 629,48	Одноставочный тариф 2,80 Дневная зона 2,81 Ночная зона 1,71	руб/1кВт*ч
Эксплуатационные затраты, руб/год	264 804,32р.	108 364,79р.		

Эксплуатационные затраты рассчитывались за каждый час каждой декады года в зависимости от показателей наружного климата для Санкт-Петербурга. Климатические параметры, такие как прямая солнечная радиация при действительных условиях облачности за каждый месяц, рассеянная и отраженная солнечная радиация при действительных условиях облачности за каждый месяц, альбедо деятельной поверхности за каждый месяц, средняя декадная температура воздуха, повторяемость сочетаний температуры воздуха и относительной влажности по месяцам, принимались по «Научно-прикладному справочнику по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Часть 1-6» [16].

Общие показатели по двум вариантам проекта сведены в табл. 3.

Таблица 3. Показатели по проектам

	Вариант № 1 (фанкойлы)	Вариант № 2 (WLHPS)
Исходные инвестиции, р.	6 897 590	7 944 395
Годовые денежные затраты на покупку энергии, р/год.	264 804,32	108 364,79
Ежегодная сумма амортизационных отчислений, руб. в год	536 759	614 439,5
Остаточная стоимость через 6 лет оборудования, р.	2 683 795	3 072 197,5
Время проекта	6 лет	6 лет

В связи с тем что вариант №1 является базовым и годовые денежные затраты по этому варианту равны 264 804,32 руб., а для варианта №2 – 108 364,79 руб., то считаем, что для варианта №2 результат, достигаемый на t-м шаге:

$$R_t = 264\,804{,}32р. - 108\,364{,}79р. = 156\,439{,}53р.,$$

а для варианта №1 результат, достигаемый на t-м шаге, R_t=0 р.

При ставке рефинасирования Центрального банка РФ 8,25% и темпе инфляции 8,5% норма дисконта будет равна:

$$E = \frac{1+8{,}25}{1+8{,}5} - 1 = -0{,}027 .$$

Расчет показателей для варианта №2:

$$ЧДД = \sum_{t=0}^{T}(R_t - З_t^+)\frac{1}{(1+E)^t} - K = \sum_{t=0}^{6}\frac{156439{,}5}{(1-0{,}027)^t} - 1046805 = 186648{,}5\,руб.;$$

$$ИД = \frac{1}{K}\sum_{t=0}^{T}(R_t - З_t^+)\frac{1}{(1+E)^t} = \frac{1}{1046805}\sum_{t=0}^{6}\frac{156439{,}5}{(1-0{,}027)^t} = 1{,}17 .$$

Расчет дисконтированных издержек по варианту №1 представлен в табл. 4.

Таблица 4. Дисконтированные издержки для варианта №1

	Годы	Денежный поток	Настоящее значение
Исходные инвестиции, р.	базовый	-6 897 590	-6 897 590
Годовая стоимость эксплуатации, р.	1 – 6	264 804,32	-1 750 474,37
Остаточная стоимость, р.	6	+2 683 795	+2 683 795
Настоящее значение денежных потерь, р.			-5 964 269,37

Расчет дисконтированных издержек по варианту № 2 представлен в табл. 5.

Таблица 5. Дисконтированные издержки для варианта №2

	Годы	Денежный поток	Настоящее значение
Исходные инвестиции, р.	базовый	-7 944 395	-7 944 395
Годовая стоимость эксплуатации, р.	1 – 6	108 364,79	-716 339,48
Остаточная стоимость, р.	6	+2 683 795	+3 072 197,5
Настоящее значение денежных потерь, р.			-5 588 536,98

Все рассчитанные показатели свидетельствуют об экономической эффективности комплексного проекта внутренних инженерных систем по варианту №2. Срок окупаемости данного проекта составит 6 лет.

Конечно, нужно отметить, что для альтернативного решения с кольцевой водяной системой с тепловыми насосами (WLHPS - water loop heat pump system) величина исходных инвестиций достаточно высока. И ожидаемый эффект от использования только одной этой системы не слишком велик. Но при комплексном подходе к решению задачи по увеличению энергосбережения, применяя, в частности, альтернативные низкопотенциальные источники тепла вместо традиционного центрального теплоснабжения, можно придать проекту достаточную инвестиционную привлекательность. Таким образом, комплексный подход и применение разумных решений по энергосбережению приведут к энергетической эффективности.

Полученные результаты расчета эксплуатационных затрат и экономической оценки эффективности двух альтернативных систем позволяют сделать следующие **выводы**.

1. Использование WLHPS в качестве местных агрегатов по сравнению с фанкойлами более целесообразно.

2. Установленные зависимости между количеством получаемой солнечной радиации, объемно-планировочными решениями, технологическими показателями использования помещений и эксплуатационными затратами для местно-центральной системы обеспечения параметров микроклимата с WLHPS в качестве местных агрегатов для современного здания офисного назначения показывают целесообразность применения таких систем.

3. Для того чтобы увеличить эффективность используемых энергетических ресурсов, необходим комплексный подход, который должен заключаться в применении схем, позволяющих не только перенаправлять потоки тепла внутри здания, но и осуществлять работу энергоснабжающего оборудования дифференцированно по зонам суток.

4. Установлено, что наиболее целесообразно использовать альтернативное оборудование по получению тепла, которое позволяет получать необходимые параметры теплоносителя в холодный период года и имеет возможность работать на охлаждение в теплый период года.

Автор выражает благодарность д.т.н. Васильеву Григорию Петровичу, руководителю Центра энергосбережения и эффективного использования нетрадиционных источников энергии в строительном комплексе, за идею этой статьи и ценные обсуждения.

А также Михаилу Петровичу Зуеву, главному энергетику ТЦ «Питер-Радуга» - за предоставленную возможность проведения исследований и оценки работы системы кондиционирования в этом торговом центре.

Литература

1. Энергосовет: Информационный электронный журнал по энергосбережению Координационного совета Президиума Генерального совета Всероссийской партии «Единая Россия» по вопросам энегосбережения и энергетической эффективности. 2011. №3(16). 78 с.
2. Аверьянова О. В. Возможности использования внутренних теплопоступлений в системах кондиционирования // Инженерные системы. 2009. №1(38). С. 26-28.
3. Аверьянова О. В. Энергоэффективные системы кондиционирования // Еврострой. 2009. №3. С.10-13.
4. Аверьянова О. В., Ватин Н. И. Климатические системы с тепловыми насосами и водяным контуром // Инженерно-строительный журнал. 2009. №2(4). С. 19-22.
5. Аверьянова О. В. Системы кондиционирования для центра обработки данных // Еврострой. 2010. №3. С. 36-40.
6. Аверьянова О. В. Энергосберегающие технические решения для местно-центральных систем обеспечения микроклимата при использовании тепловых насосов в качестве местных агрегатов, объединенных в единый водяной контур // Инженерно-строительный журнал. 2011. №1(19). С. 37-45.
7. Аверьянова О. В. О комплексном подходе к проектированию систем жизнеобеспечения с целью повышения ресурсо- и энергосбережения // Инженерные системы. 2011. №2. С. 50-55.
8. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии / Москомархитектура. М. , 2001. 60 с.
9. Васильев Г. П. Энергоэффективный экспериментальный жилой дом в микрорайоне Никулино-2 // АВОК. 2002. №4. С. 10-21.
10. Дацюк Т. А., Васильев В. Ф., Дерюгин В. В., Ивлев Ю. П. Новая технология проектирования систем обеспечения микроклимата зданий // Вестник гражданских инженеров. СПб. 2005. №3(4). С. 57-63.
11. Дацюк Т. А., Леонтьева Ю. Н., Мелех Т. Х. Улучшение тепловой защиты зданий // Инженерные системы. СПб. 2007. № 3(30). С. 52-55.
12. Петраков Г. Н., Бараков А. В., Стогней В. Г., Мартынов А. В. Методы повышения эффективности конденсатора теплового насоса // Физико-технические проблемы энергетики, экологии и энергоресурсосбережения : Труды науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж , 2006. Вып. 5. С. 14-20.
13. Lang S. W., Xu W., Feng T. S. Issues of design and application of the centralized air conditioning system with water source heat pump units // J. HVAC. 1996. №26(1). Pp. 15–19.
14. Wang F. Discussions on the design of the air conditioning system with water source heat pump units // Building Energy Environ. 1996. №4. Pp. 40–44.
15. Ma Z. L., Cao Y. Static state analyses on the operating energy consumption of water-loop heat pump air conditioning system // J. Harbin Inst. Technol. 1997. №6. Pp. 68–74.
16. Научно-прикладной справочник по климату СССР: Сер. 3: Многолетние данные. Вып. 3: Карельская АССР, Ленингр., Новгор., Псков. Калинин. и Смолен. обл. Л. : Гидрометеоиздат, 1988. 447 с.

**Олеся Валерьевна Аверьянова, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(911)996-83-47; эл. почта: olesyaav@yandex.ru

Экспертно-статистический метод оценивания параметров управляющих воздействий на инженерные сети зданий в условиях неопределенности

Старший преподаватель Т.Н. Солдатенко*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: нечеткие переменные; показатели надежности; аналитическое моделирование

Инженерные сети играют важную роль в жизнеобеспечении зданий и сооружений. Качество их функционирования в значительной мере зависит от уровня надежности и долговечности [1,2]. Для обеспечения этих свойств осуществляются необходимые управляющие воздействия, к которым относятся профилактическое обслуживание, плановый и неплановый ремонт, модернизация, реконструкция инженерных сетей зданий [3,4,5]. Важнейшим показателем указанных мероприятий является периодичность управляющих водзействий. В настоящее время разработано большое число моделей управления состоянием инженерных сетей [6,7 и др.]. В них величина интервалов между смежными управляющими воздействиями используется как аргумент в расчетных соотношениях для показателей качества инженерных систем. При этом период между управляющими мероприятиями рассматривается как детерминированная величина [3,8,9].

Однако данный подход имеет существенный недостаток, состоящий в том, что рассматриваемый показатель может быть также случайной или нечеткой величиной. Это обусловлено действием ряда факторов. Согласно данным, приведенным в [3], долговечность инженерных сетей (рис. 1) значительно меньше, чем у конструктивных элементов зданий, в которых они функционируют.

Это приводит к необходимости проведения реконструкции или модернизации соответствующих сетей при существенной неопределенности состояния зданий. При этом сами показатели долговечности оцениваются главным образом экспертными методами [3, 10]. Для инженерных систем зданий характерен также не только физический, но и моральный износ, обусловленный трудно прогнозируемыми предпочтениями пользователей зданий и сооружений [2, 11].

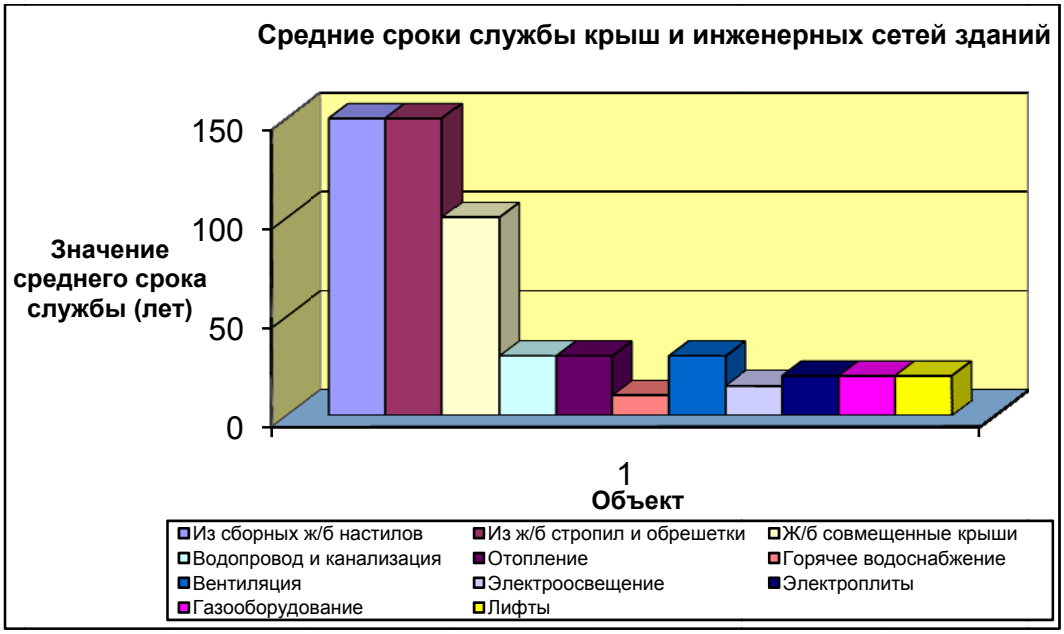


Рисунок 1. Сравнительные данные по долговечности крыш и инженерных систем зданий и сооружений

Проведенными исследованиями [12] установлено, что даже в условиях плановой централизованной экономики и достаточно устойчивого финансирования содержания зданий и сооружений более чем в 90% случаев реальное время проведения управляющих воздействий переносилось в силу различных обстоятельств. Это привело к рассмотрению интервала между управляющими воздействиями как случайной величины [4, 9] и получению рекомендаций по формированию управляющих мероприятий с учетом этой особенности.

На современном этапе развития страны ситуация по управлению состоянием зданий (сооружений) и их инженерных сетей характеризуется возросшим уровнем неопределенности условий принятия решений о параметрах управления. Основными причинами такого положения являются следующие [13]:

- децентрализация системы управления состоянием зданий и сооружений;
- нестабильность и сокращение возможностей финансирования управляющих воздействий;
- сокращение источников объективной информации о состоянии зданий и их инженерных сетей;
- общее снижение уровня компетентности обслуживающего персонала и др.

Такое положение позволяет сделать вывод о том, что известные подходы к планированию мероприятий по управлению состоянием инженерных сетей зданий не в полной мере соответствуют сложившейся ситуации. Выходом из нее может стать рассмотрение интервалов времени между управляющими мероприятиями как нечетких величин [14] и использование аппарата нечеткой логики при оценке качества функционирования инженерных сетей. Этот подход является актуальным для современного состояния системы управления инженерными сетями, поскольку позволяет расширить информационную базу принятия решений о проведении управляющих воздействий. Объектом рассмотрения в настоящей статье выступают инженерные сети зданий и сооружений. Предметом исследования является процесс формирования нечетких оценок показателей качества функционирования инженерных сетей. Практическая значимость получаемых результатов состоит в том, что при таком подходе повышается обоснованность принимаемых решений по обеспечению качества функционирования инженерных сетей зданий. Перейдем к изложению существа предлагаемого метода.

Построение модели нечетких показателей качества функционирования инженерных сетей зданий

Пусть результативность функционирования инженерной сети здания описывается некоторым показателем π, который может быть выражен в терминах экономики, технологии или надежности. Величина показателя π некоторым образом функционально зависит от интервала времени $\tau_{УВ}$ до очередного управляющего воздействия. При классическом «четком» подходе эта зависимость может быть представлена в виде общего соотношения:

$$\pi = G(\tau_{УВ}), \tag{1}$$

где G - вид функциональной зависимости.

При формировании соотношения (1) предполагается, что неопределенность при принятии решения отсутствует, а показатель $\tau_{УВ}$ является детерминированной «четкой» величиной, например, «100 часов». Введем теперь условие неопределенности ω ситуации. Это условие означает невозможность на практике точного указания значения $\tau_{УВ}$. В силу действия ω будем рассматривать величину интервала времени $\tau_{УВ}$ до очередного управляющего воздействия как нечеткую переменную $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$ [14]. Это позволяет использовать при назначении значения $\tau_{УВ}$ такие термины, как «почти 100 часов», «несколько более 100 часов» и подобные, вместо точного «четкого» значения «100 часов». Указанные «нечеткие» значения $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$ могут быть получены в виде мнений экспертов при оценивании величины $\tau_{УВ}$. В этом случае соотношение (1) преобразуется к виду:

$$\pi = G(\underset{\sim}{\tau}_{УВ}, \omega). \tag{2}$$

Такой прием позволяет объединить накопленную ретроспективную информацию о характере изменения качества инженерных сетей здания, которая определяется видом G, и неформальную экспертную информацию [10], отражающую компетентность и знания специалистов, что описывается нечеткой переменной $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$. Рассмотрим методику решения данной задачи применительно к случаю, когда показатель π характеризует надежность инженерных сетей здания.

Предлагается использовать следующую двухэтапную процедуру. На первом этапе следует применить традиционный, «четкий» подход к описанию показателей надежности [15, 16]. В результате этого этапа будут сформированы соответствующие аналитические зависимости, в которых интервалы $\tau_{УВ}$ рассматриваются как аргументы.

На втором этапе необходимо в полученных моделях заменить «четкие» значения интервалов $\tau_{УВ}$ на их нечеткие аналоги $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$ и выполнить соответствующие расчеты показателей надежности по правилам нечеткой логики [14]. Рассмотрим порядок выполнения указанных этапов.

Получим математическое описание закономерностей поведения инженерных сетей здания на интервале $\left[0, \tau_{УВ}\right]$ между смежными управляющими воздействиями. Предположим, что при анализе накопленной ранее статистической информации установлен вид плотности вероятности $f(\tau)$ случайной величины наработки τ между отказами инженерных сетей [15, 17]. На основе знания $f(\tau)$ не составляет труда с помощью известных соотношений определить показатели надежности [15]. К ним могут относиться вероятность безотказной работы $P(\tau)$ анализируемой инженерной сети, средняя продолжительность $\overline{\tau}_p$ нахождения ее в работоспособном состоянии на интервале до очередного управляющего воздействия и т.д. Например, при четком значении $\tau_{УВ}$ средняя продолжительность $\overline{\tau}_p$ нахождения инженерной сети в работоспособном состоянии на интервале до очередного обслуживания определяется по формуле [15]:

$$\overline{\tau}_p = \int_0^{\tau_{УВ}} P(x)dx\,, \tag{3}$$

где $P(x)$ - вероятность безотказной работы ИСЗ на интервале наработки $\left[0, x\right]$.

Учтем теперь допущение о том, что интервал до очередного управляющего воздействия – нечеткая величина, и подставим в формулу (3) вместо параметра $\tau_{УВ}$ его нечеткий аналог – $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$. При сделанном предположении интервал до очередного управляющего воздействия описывается следующим образом [14]:

$$\underset{\sim}{\tau}_{УВ} = \left\{ \left\langle x, \underset{\underset{\sim}{\tau}_{УВ}}{\mu(x)} \right\rangle \right\}, \tag{4}$$

где x - нечеткая переменная, характеризующая значение величины интервала до очередного управляющего воздействия;

$\underset{\underset{\sim}{\tau}_{УВ}}{\mu(x)}$ - функция принадлежности нечеткого числа $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$.

Используя выражение для вероятности безотказной работы $P(\tau)$, рассчитаем $P(\underset{\sim}{\tau}_{УВ})$ и, соответственно, нечеткую величину $\underset{\sim}{\overline{\tau}}$ средней продолжительности нахождения средства в работоспособном состоянии на интервале до очередного управляющего воздействия. Эта величина будет представлять собой нечеткое множество вида:

$$\underset{\sim}{\overline{\tau}}_P = F^{(Нч)}(\underset{\sim}{\tau}_{УВ}) = \left\{ \left\langle x, \underset{\underset{\sim}{\tau}_{УВ}}{\mu(x)} \right\rangle \right\}, \tag{5}$$

где $F^{(Нч)}(\tau_{УВ})$ - аналитическое описание нечеткой функции, аргументом которой является нечеткое значение интервала до очередного управляющего воздействия $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$.

Таким образом, выражение для нечеткой величины $\underset{\sim}{\overline{\tau}}_p$ средней продолжительности нахождения инженерной сети здания в работоспособном состоянии на интервале между смежными управляющими воздействиями приобретает вид:

$$\overline{\underset{\sim}{\tau}}_p = \int_0^{\underset{\sim}{\tau}_{УВ}} P(x)dx = \left\{ \left\langle \tau_{УВ}, \underset{\underset{\sim}{\tau}_{УВ}}{\mu(\tau_{УВ})} \right\rangle \right\}. \quad (6)$$

Проанализируем выражение (6). Использование при расчете аналитической функции надежности $P(\tau)$ нечеткой верхней границы интегрирования $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$ позволяет учесть экспертную информацию, отражающую опыт и знания специалистов. Таким образом, в общем аналитическом выражении совместно используется статистическая «четкая» информация и нечеткая экспертная информация. Рассмотренный подход позволяет существенно снизить уровень неопределенности при принятии решений по управлению состоянием инженерных систем зданий и сооружений. Проиллюстрируем работоспособность предлагаемой методики на расчетном примере.

Численная апробация предлагаемого метода

Постановка задачи

Исполнительным элементом системы вентиляции здания является компрессор. По результатам эксплуатации аналогичных агрегатов известно, что наработка на отказ τ компрессора имеет нормальное распределение с параметрами: математическое ожидание $M[\tau] = m = 200$ час.; СКО $\sigma[\tau] = \sigma = 50$ час. Управляющим воздействием является профилактическое обслуживание. Согласно эксплуатационной документации интервал времени $\tau_{УВ}$ до очередного профилактического обслуживания компрессора равен 300 часам. Однако в силу неопределенности экономической ситуации неизвестно, удастся ли провести очередное профилактическое обслуживание в установленный срок. Статистически оценить возможный интервал не представляется возможным из-за отсутствия необходимых данных.

Для оценки искомой величины проведен экспертный опрос. Его результаты представлены для интервала времени $\tau_{УВ}$ в виде нечеткой переменной $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$. При этом функция принадлежности $\underset{\underset{\sim}{\tau}_{УВ}}{\mu(x)}$ для $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$ имеет треугольную форму с координатами вершин: $(b_1;0)$, $(b_3;1)$, $(b_5;0)$. При этом $b_1 = 200$ час.; $b_3 = 300$ час.; $b_5 = 400$ час. Необходимо найти оценки среднего времени нахождения компрессора в работоспособном состоянии на интервале до очередного профилактического обслуживания.

Решение задачи

Для решения задачи будем использовать выражение (3). В соответствии с условиями задачи можно записать:

$$f(\tau) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\tau - m)^2}{2 \cdot \sigma^2}}. \quad (7)$$

С учетом формулы (7) выражение для $P(\tau)$ имеет вид [15]:

$$P(\tau) = \int_{\tau}^{\infty} f(x)dx. \quad (8)$$

Теперь рассмотрим, как ввести в выражение (8) нечеткую величину $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$. Первоначально сделаем переход от непрерывного нечеткого множества $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$ к дискретному $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}^{(d)}$ [14]. Нечеткая переменная $\underset{\sim}{\tau}_{УВ}$ теперь представляется в виде:

$$\underset{\sim}{\tau}_{TO} = \left\{ \left\langle \underset{\sim}{b}_1, 0 \right\rangle, \left\langle \underset{\sim}{b}_2, 0,5 \right\rangle, \left\langle \underset{\sim}{b}_3, 1 \right\rangle, \left\langle \underset{\sim}{b}_4, 0,5 \right\rangle, \left\langle \underset{\sim}{b}_5, 0 \right\rangle \right\}, \quad (9)$$

где

$$\underset{\sim}{b}_j = \left\langle b_j, \mu_j \right\rangle. \quad (10)$$

Переменные $\underset{\sim}{b}_j$ являются нечеткими точками [14]. Рассмотрим теперь значения нечеткой величины $\underset{\sim}{\overline{\tau}}_p$ среднего времени нахождения компрессора в работоспособном состоянии для множества дискретных значений нечетких точек $\underset{\sim}{b}_j$, определяемых соотношением (9). В итоге получаем множество:

$$\underset{\sim}{\Omega}^{\tau} = \left\{ \left\langle \tau_{p_j}, \underset{\underset{\sim}{\overline{\tau}}_j}{\mu(\tau_{p_j})} \right\rangle \right\}. \qquad (11)$$

Результаты расчетов удобно представить в табличной форме.

Таблица 1. Среднее время нахождения компрессора в р/с состоянии

Индекс нечеткой точки (j)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
$\underset{\sim}{\tau}_{УВ_j}$	$\underset{\sim}{\tau}_{УВ_1}$	$\underset{\sim}{\tau}_{УВ_2}$	$\underset{\sim}{\tau}_{УВ_3}$	$\underset{\sim}{\tau}_{УВ_4}$	$\underset{\sim}{\tau}_{ТО_5}$
$\underset{\underset{\sim}{\tau}_{УВ_j}}{\mu(\tau_{УВ_j})}$	0	0,5	1	0,5	0
$\underset{\sim}{\overline{\tau}}_j^{(d)}$	$\underset{\sim}{\overline{\tau}}_1^{(d)}$	$\underset{\sim}{\overline{\tau}}_2^{(d)}$	$\underset{\sim}{\overline{\tau}}_3^{(d)}$	$\underset{\sim}{\overline{\tau}}_4^{(d)}$	$\underset{\sim}{\overline{\tau}}_5^{(d)}$

Тогда имеем следующие расчетные результаты. Теоретическое изменение плотности распределения времени безотказной работы компрессора представлено на рис. 2. Для расчетов применена формула (7).

Изменение четкой вероятности безотказной работы компрессора при заданных исходных данных представлено на рис. 3. Расчетные значения получены в соответствии с формулой (8).

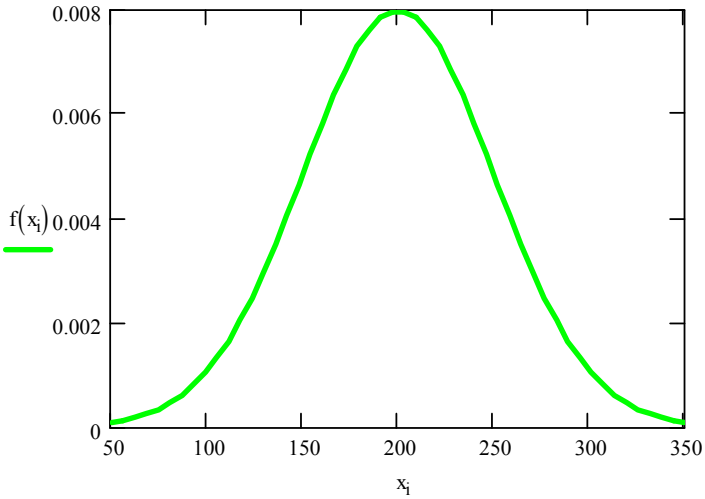


Рисунок 2. Характер изменения плотности распределения времени безотказной работы компрессора

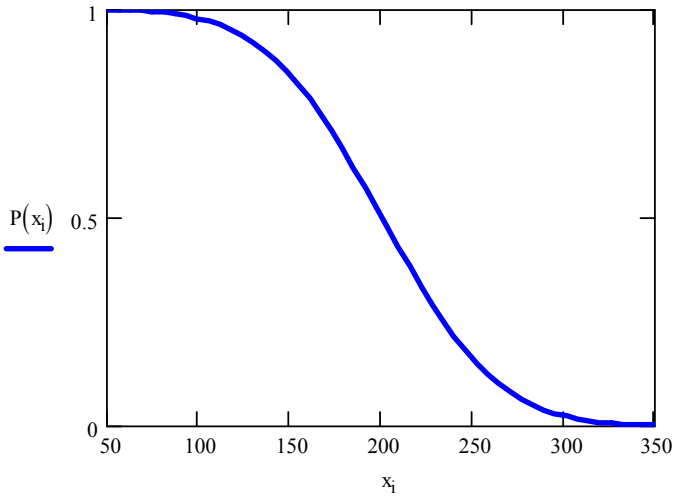


Рисунок 3. Изменение вероятности безотказной работы компрессора

Функция принадлежности, построенная по результатам экспертного опроса о величине возможного интервала до очередного профилактического обслуживания компрессора, характеризуется графиком на рис. 4.

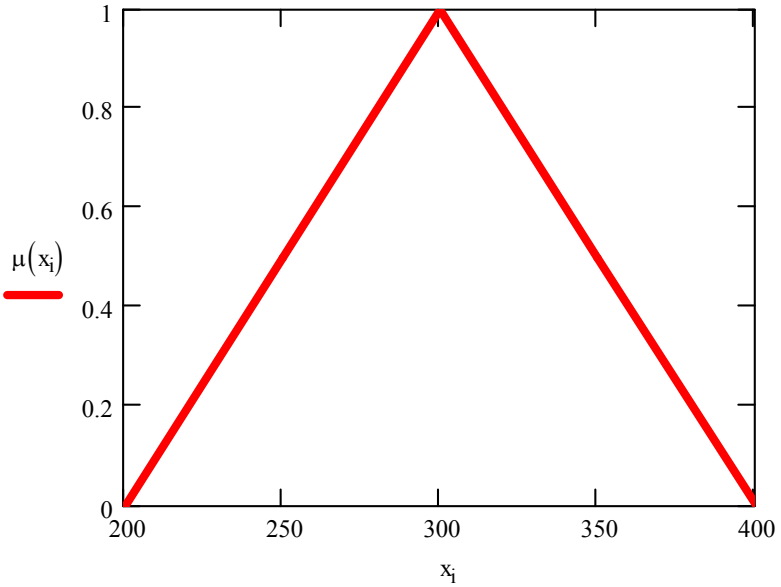


Рисунок 4. Функция принадлежности величины интервала до очередного профилактического обслуживания компрессора

Нечеткие значения среднего времени нахождения компрессора в безотказном состоянии на интервале до очередного профилактического обслуживания представлены на рис. 5. Расчетные значения получены в соответствии с выражением (3).

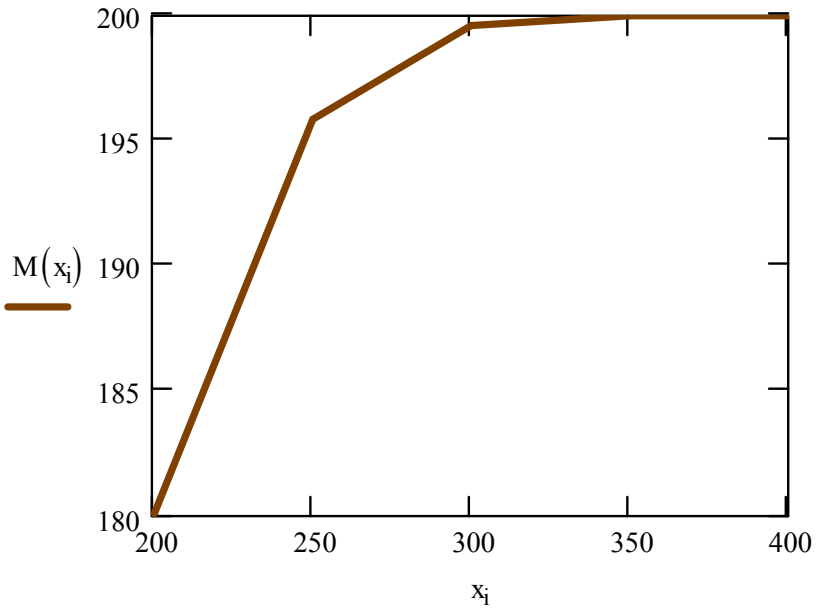


Рисунок 5. Значения нечеткого среднего времени безотказного функционирования компрессора на интервале до очередного профилактического обслуживания

Анализ графика на рис. 5 показывает, что среднее время безотказного функционирования компрессора на интервале до очередного управляющего воздействия асимптотически стремится к теоретическому значению его средней наработки на отказ. Полученные расчетные результаты можно представить в табл. 2, аналогичной табл. 1.

Таблица 2. Итоговые результаты расчетов

Индекс нечеткой точки (j)	1	2	3	4	5
$\underset{\sim}{\tau}_{УВ_j}$ (час.)	200	250	300	350	400
$\mu(\tau_{УВ_j})$ $\underset{\sim}{\tau}_{УВ_j}$	0	0,5	1	0,5	0
$\overline{\underset{\sim}{\tau}}_j^{(d)}$ (час.)	180,05	195,84	199,58	199,98	200,00

Таким образом, получены нечеткие значения среднего времени нахождения компрессора в работоспособном состоянии на интервале до его очередного профилактического обслуживания. При этом объективная информация о характере изменения безотказности компрессора дополняется субъективной информацией, предоставляемой специалистами-экспертами, анализирующими ситуацию о возможности проведения управляющего воздействия на компрессор в реальных условиях экономической ситуации. Аналогичные соотношения могут быть получены и в случае использования показателей качества функционирования инженерных сетей зданий, имеющих иной физический смысл.

Выводы

На основе представленного материала можно сделать следующие выводы. При отсутствии информации о точных сроках проведения управляющих воздействий на инженерные сети зданий применим математический аппарат нечеткой логики. При этом целесообразно использовать комбинированные расчетные соотношения для показателей, которые объединяют как накопленные (ретроспективные) данные о свойствах исследуемых объектов, так и заключения экспертов. Использование полученных с помощью нечеткой логики расчетных результатов позволяет повысить обоснованность принимаемых решений по обеспечению функционирования инженерных сетей за счет снижения уровня неопределенности объективных условий материального обеспечения эксплуатации зданий.

Анализ известных работ, посвященных обоснованию управляющих воздействий на сложные технологические объекты, показал, что в рассматриваемых методиках планирования не учитывается существенная неопределенность при организации эксплуатации зданий и их инженерных сетей. Однако в современных условиях действует совокупность факторов, приводящих к слабо прогнозируемому изменению плановых сроков проведения требуемых эксплуатационных мероприятий.

Поэтому в статье обоснована актуальность рассмотрения интервалов до очередных управляющих воздействий на инженерные сети в виде нечетких переменных. Это позволяет объединять экспертные заключения с имеющимися предварительными данными о свойствах инженерных сетей и получать прогнозные значения требуемых показателей их качества с помощью математического аппарата нечеткой логики. Такое комбинированное использование информации различного типа позволяет снижать уровень неопределенности экономической ситуации и принимать более обоснованные решения по воздействию на инженерные сети зданий.

Обоснованность принимаемых решений характеризуется значением функции принадлежности, сформированной экспертным методом, для каждого из значений нечеткого интервала до очередного управляющего воздействия. Данный подход может найти практическое применение в управляющих компаниях, обслуживающих жилищный фонд, а также в эксплуатационных подразделениях предприятий, на балансе которых имеются здания и сооружения.

Литература

1. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения: Справочник // Под ред. В.Д. Дмитриева, Б.Г. Мишукова. Л. : Стройиздат, Ленигр. отд-ние, 1988. 338 с.
2. Алексеев М. И., Мишуков Б. Г., Дмитриев В. Д. и др. Эксплуатация систем водоотведения и канализации, М.: Высшая школа, 1993. – 272 с.
3. Рогонский В. А. Эксплуатационная надежность зданий и сооружений / В.А. Рогонский, А.И. Кострица, В.Ф. Шеряков и др. – СПб.: ОАО Издательство «Стройиздат СПб», 2004.– 272 с.
4. Игнатчик С. Ю. Обеспечение надежности и энергосбережения при расчете сооружений для транспортирования сточных вод. // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 8, с. 56.
5. Поршнев В. Н., Привен Е. М., Битиев А. В. Принципы обеспечения надежности функционирования системы водоснабжения. // Водоснабжение и санитарная техника. 2007. № 7, ч. 1, с. 40.
6. Аснина А. Я., Аснина Н. Г., Ефимова О. Е., Шипилов В. Н. Механизмы построения оптимального плана технического обслуживания и ремонтов инженерных сетей. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2008. Т. 4. № 8. С. 125-128.
7. Merenkov A., Sennova E., Sumarokov S. Optimization of development of heat and water supply system // Sov. Techn. Rev., A, Energy. New York : Harwood Academic Publ. GmbH, 1994. Vol. 6.1. Part 4. P.1-31.
8. Grigg Neil S. Urban Water infrastructure: Planning, management and operations New York etc.: Wiley cop. 1986. 328 p.
9. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. / Пер. с нем. М. : Радио и связь, 1988. 392 с.
10. Попов Э.В. Экспертные системы. М. : Наука, 1987. 284 с.
11. Huppi W. Facility Management. ERNST & SOHN, 1998. 250 p.
12. Зеленцов В. А. Надежность, живучесть и техническое обслуживание сетей связи. Л. : МО, 1991. 169 с.
13. Кобилев А. Г., Кирнеев А. Д., Рудой В. В. Муниципальное управление и социальное планирование в муниципальном хозяйстве. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 608 с.
14. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / пер. с англ. М. : Мир, 1976. 166 с.
15. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
16. Ильин Ю. А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. М. : Стройиздат., 1985. 240 с.
17. Алексеев М. И., Ермолин Ю. А. Вероятностные характеристики времени наработки между отказами восстанавливаемых объектов водопроводно-канализационного хозяйства // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. № 5. С. 26.

**Тамара Николаевна Солдатенко, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)297-59-49; эл. почта: soldatenko-tn@bk.ru

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Инженерно-строительный факультет
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,
тел/факс: 552-94-60, www.stroikursi.spb.ru.
stroikursi@mail.ru

Приглашает специалистов организаций, вступающих в СРО, на курсы повышения квалификации (72 часа)

Код	Наименование программы	Виды работ*
Курсы по строительству		
БС-01	«Безопасность и качество выполнения геодезических, подготовительных и земляных работ, устройства оснований и фундаментов»	**1,2,3,5**
БС-02	«Безопасность и качество возведения бетонных и железобетонных конструкций»	**6,7**
БС-03	«Безопасность и качество возведения металлических, каменных и деревянных конструкций»	**9,10,11**
БС-04	«Безопасность и качество выполнения фасадных работ, устройства кровель, защиты строительных конструкций, трубопроводов и оборудования»	**12,13,14**
БС-05	«Безопасность и качество устройства инженерных сетей и систем»	**15,16,17,18,19**
БС-06	«Безопасность и качество устройства электрических сетей и линий связи»	**20,21**
БС-08	«Безопасность и качество выполнения монтажных и пусконаладочных работ»	**23,24**
БС-11	«Безопасность и качество устройства подземных сооружений»	**27,28**
БС-12	«Безопасность и качество устройства мостов, эстакад и путепроводов»	**29**
БС-13	«Безопасность и качество выполнения гидротехнических, водолазных работ»	**30**
БС-14	«Безопасность и качество устройства промышленных печей и дымовых труб»	**31**
БС-15	«Осуществление строительного контроля»	**32**
БС-16	«Организация строительства, реконструкции и капитального ремонта. Выполнение функций заказчика-застройщика и генерального подрядчика»	**33**
Курсы по проектированию		
БП-01	«Разработка схемы планировочной организации земельного участка, архитектурных решений, мероприятий по обеспечению доступа маломобильных групп населения»	**1,2,11**
БП-02	«Разработка конструктивных и объемно-планировочных решений зданий и сооружений»	**3**
БП-03	«Проектирование внутренних сетей инженерно-технического обеспечения»	**4**
БП-04	«Проектирование наружных сетей инженерно-технического обеспечения»	**5**
БП-05	«Разработка технологических решений при проектировании зданий и сооружений»	**6**
БП-06	«Разработка специальных разделов проектной документации»	**7**
БП-07	«Разработка проектов организации строительства»	**8**
БП-08	«Проектные решения по охране окружающей среды»	**9**
БП-09	«Проектные решения по обеспечению пожарной безопасности»	**10**
БП-10	«Обследование строительных конструкций и грунтов основания зданий и сооружений»	**12**
БП-11	«Организация проектных работ. Выполнение функций генерального проектировщика»	**13**
Курсы по инженерным изысканиям		
И-01	«Инженерно-геодезические изыскания в строительстве»	**1**
И-02	«Инженерно-геологические изыскания в строительстве»	**2,5**
И-03	«Инженерно-гидрометеорологические изыскания в строительстве»	**3**
И-04	«Инженерно-экологические изыскания в строительстве»	**4**
ПР-09	«Обследование строительных конструкций и грунтов основания зданий и сооружений»	**6**
И-05	«Организация работ по инженерным изысканиям»	**7**

***(согласно приказам Минрегионразвития РФ N 624 от 30 декабря 2009 г.)**

По окончании курса слушателю выдается удостоверение о краткосрочном повышении квалификации государственного образца (72 ак. часа)

Для регистрации на курс необходимо выслать заявку на участие, и копию диплома об образовании по телефону/факсу: 8(812) 552-94-60, 535-79-92, , e-mail: stroikursi@mail.ru.

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Инженерно-строительный факультет
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,
тел/факс: 552-94-60, www.stroikursi.spb.ru.
stroikursi@mail.ru

Приглашает специалистов проектных и строительных организаций,
не имеющих базового профильного высшего образования
на курсы профессиональной переподготовки (от 500 часов)
по направлению «Строительство» по программам:

П-01 «Строительство зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы строительного дела***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Технология и контроль качества строительства***
- ***Основы проектирования зданий и сооружений***
- ***Автоматизация проектных работ с использованием AutoCAD***
- ***Автоматизация сметного дела в строительстве***
- ***Управление строительной организацией***
- ***Управление инвестиционно-строительными проектами. Выполнение функций заказчика-застройщика***

П-02 «Экономика и управление в строительстве»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы строительного дела***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Технология и контроль качества строительства***
- ***Управление инвестиционно-строительными проектами. Выполнение функций заказчика-застройщика и генерального подрядчика***
- ***Управление строительной организацией***
- ***Экономика и ценообразование в строительстве***
- ***Управление строительной организацией***
- ***Организация, управление и планирование в строительстве***
- ***Автоматизация сметного дела в строительстве***

П-03 «Инженерные системы зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы механики жидкости и газа***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Проектирование, монтаж и эксплуатация систем вентиляции и кондиционирования***
- ***Проектирование, монтаж и эксплуатация систем отопления и теплоснабжения***
- ***Проектирование, монтаж и эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения***
- ***Автоматизация проектных работ с использованием AutoCAD***
- ***Электроснабжение и электрооборудование объектов***

П-04 «Проектирование и конструирование зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы сопротивления материалов и механики стержневых систем***
- ***Проектирование и расчет оснований и фундаментов зданий и сооружений***
- ***Проектирование и расчет железобетонных конструкций***
- ***Проектирование и расчет металлических конструкций***
- ***Проектирование зданий и сооружений с использованием AutoCAD***
- ***Расчет строительных конструкций с использованием SCAD Office***

П-05 «Контроль качества строительства»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы строительного дела***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Технология и контроль качества строительства***
- ***Проектирование и расчет железобетонных конструкций***
- ***Проектирование и расчет металлических конструкций***
- ***Обследование строительных конструкций зданий и сооружений***
- ***Выполнение функций заказчика-застройщика и генерального подрядчика***

По окончании курса слушателю выдается диплом о профессиональной переподготовке государственного образца, дающий право на ведение профессиональной деятельности