

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе и  
образовательным инновациям

О.Н. Здрок

«02» июля 2021 г.

Регистрационный № УД – 10429/уч.

## **ФОРМАЛЬНАЯ СЕМАНТИКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММ**

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:**

**1-31 03 03 Прикладная математика (по направлениям)**

Направление специальности

1-31 03 03-01 Прикладная математика (научно-производственная  
деятельность)

2021 г.

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта высшего образования ОСВО 1-31 03 03-2013 и учебных планов № G31-173/уч., № G31и-190/уч. от 30.05.2013.

**СОСТАВИТЕЛИ:**

**Курбацкий А.Н.**, заведующий кафедрой технологий программирования факультета прикладной математики и информатики Белорусского государственного университета, доктор технических наук, профессор;

**Винник В.Ю.**, преподаватель кафедры технологий программирования факультета прикладной математики и информатики Белорусского государственного университета.

**РЕЦЕНЗЕНТ:**

**Медведев С.А.**, доцент кафедры программного обеспечения информационных технологий УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», к.т.н., доцент.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой технологий программирования Белорусского государственного университета  
(протокол № 16 от 28.05.2021);

Советом факультета прикладной математики и информатики БГУ  
(протокол № 11 от 22.06.2021).

Заведующий кафедрой

технологий программирования



А.Н. Курбацкий

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

### Цели и задачи учебной дисциплины

**Цель учебной дисциплины** – ознакомление студентов с основами формальных семантик языков программирования, методов формальной спецификации и верификации программ, формирование теоретических знаний в области верификации программного обеспечения и практических навыков анализа, верификации и тестирования программных средств.

### Задачи учебной дисциплины:

1. Изучение основных методов формальной спецификации программного обеспечения.
2. Изучение методов формального доказательства правильности программных средств.
3. Выработка навыка рассуждения о гарантиях корректности программ.

**Место учебной дисциплины** в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина относится к **циклу** дисциплин специализации компонента учреждения высшего образования. В современном информационном обществе существует востребованность в специалистах по формальной семантике и верификации программ, синтаксическому, семантическому и прагматическому уровням знаковой системы, аксиоматической семантики Хоара, моделированию поведения программ.

В дисциплине уделяется достаточное внимание изучению связей программирования с прикладной математикой, проблематике знаков, смыслов и значений в задачах верификации и синтеза программ.

Программа составлена с учетом **межпредметных связей** с учебными дисциплинами.

Основой для изучения дисциплины «Формальная семантика и верификация программ» являются учебные дисциплины I ступени высшего образования «Программирование», «Дискретная математика и математическая логика», «Алгоритмы и структуры данных».

### Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Формальная семантика и верификация программ» должно обеспечить формирование следующих академических, социально-личностных и профессиональных компетенций:

#### **академические** компетенции:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

#### **социально-личностные** компетенции:

СЛК-3. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

СЛК-6. Уметь работать в команде.

**профессиональные** компетенции:

ПК-1. Работать с научно-технической, нормативно-справочной и специальной литературой.

ПК-2. Заниматься аналитической и научно-исследовательской деятельностью в области прикладной математики.

ПК-5. Владеть современными методами математического моделирования систем и процессов, участвовать в исследованиях новых методов и технологий.

ПК-6. Владеть методами автоматизации научных исследований и применять их в своей работе.

ПК-7. Разрабатывать, анализировать и оптимизировать алгоритмы исследования математических моделей естественнонаучных, производственных и социально-экономических задач.

ПК-8. Разрабатывать, эксплуатировать и сопровождать соответствующие программные компьютерные системы.

ПК-9. Пользоваться методами и средствами прикладной математики и программирования при разработке программного обеспечения соответствующих технологических задач.

ПК-10. Обрабатывать полученные результаты, анализировать их с учетом имеющихся научно-технологических достижений.

ПК-11. Владеть алгоритмическим мышлением и современными языками программирования для программной реализации алгоритмов решения задач.

ПК-12. Анализировать варианты и находить оптимальные проектные решения.

ПК-20. Анализировать и оценивать собранные данные.

ПК-29. Разрабатывать новые информационные технологии на основе математического моделирования и оптимизации.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

**знать:**

- суть синтаксиса и семантики языков программирования;
- основные формальные модели семантики;
- семантику операторов и конструкций императивных языков программирования;
- методы доказательства правильности программ.

**уметь:**

- составлять формальную спецификацию программы;
- устанавливать, удовлетворяет ли данный программный текст данной спецификации.

**владеть:**

- теоретическими знаниями, необходимыми для анализа корректности программ и синтеза гарантированно корректных программ;

- методами рассуждения о правильности программ;
- навыками создания заведомо корректной реализации по заданной спецификации.

### **Структура учебной дисциплины**

Дисциплина изучается в шестом семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Формальная семантика и верификация программ» отведено для очной формы получения высшего образования – 54 часа, в том числе 34 аудиторных часа, из них: лекции – 34 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 1,5 зачетных единиц.

Форма текущей аттестации – зачет.

## **СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА**

### **Тема 1. Введение в формальную семантику и верификацию программ**

Роль и значение формальных методов спецификации и верификации программ. Роль математических методов в инженерных и научных дисциплинах. Связь программирования с прикладной математикой. Недостаточность эмпирических подходов для обеспечения корректности программ. Общая постановка задач верификации и синтеза программ. Понятие о семиотике. Синтаксический, семантический и прагматический уровни знаковой системы. Проблематика знака, смысла и значения. Специфика программирования как знаковой системы. Операционная, денотационная и аксиоматическая семантики.

### **Тема 2. Основы аксиоматической семантики Хоара**

Хоаровские тройки. Предусловия и постусловия. Частичная и полная корректность. Свойства хоаровских троек, непосредственно следующие из определения: законы тавтологии и консеквенции, дистрибутивность относительно дизъюнкции и конъюнкции. Семантика пустой, зависающей и хаотической программ. Семантика последовательного выполнения. Семантика оператора присваивания. Семантика операции ветвления. Правило вывода для оператора цикла. Понятие инварианта цикла. Проблема завершимости цикла. Разбор примеров.

### **Тема 3. Семантика слабейших предусловий**

Слабейшее предусловие как точная нижняя грань всех предусловий, удовлетворяющих спецификации. Свойства слабейших предусловий. Дистрибутивность относительно конъюнкции. Дистрибутивность относительно дизъюнкции как отличительный признак детерминированных программ. Закон исключённого чуда. Слабейшее свободное постусловие и семантика частичной корректности. Пустой оператор, зависание и хаос в семантике слабейшего предусловия. Операторы присваивания, операторы последовательного выполнения и ветвления в терминах слабейшего предусловия. Слабейшее предусловие и оператор цикла. Общее понятие неподвижной точки. Неподвижные точки в полных решётках. Неподвижные точки и операторы замыкания. Понятие непрерывности как свойства сохранения предела. Оператор цикла как неподвижная точка. Оператор цикла как предел последовательности условных операторов. Свойство непрерывности и ограничение недетерминированности.

### **Тема 4. Реляционная семантика Хоара**

Моделирование поведения программ с помощью отношений. Соответствие между логическими операциями и операторами языков программирования. Законы реляционной семантики. Антиномии реляционной семантики. Исчисление проектов и отношение детализовки. Условия допустимости. Соответствия Галуа. Пред- и постспецификации. Отношения

симуляции. Операционная семантика и вопросы реализации. Моделирование выполнения программ в реляционной семантике. Операторы перехода.

### **Тема 5. Типы данных в языках программирования**

Тип данных как множество значений с совокупностью операций. Абстрактные типы данных. Система типов данных как многосортная алгебра. Тип как расширение многосортной алгебры. Аксиоматические теории типов данных

Аксиомы для типов данных. Разбор примера: стек. Метод доказательства корректности программы, использующей алгебраический тип. Корректность реализации алгебраического типа данных.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

| Номер раздела, темы | Название раздела, темы                                 | Количество аудиторных часов |                      |                     |                      |      | Количество часов<br>УСР | Форма контроля знаний |
|---------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|------|-------------------------|-----------------------|
|                     |                                                        | Лекции                      | Практические занятия | Семинарские занятия | Лабораторные занятия | Иное |                         |                       |
| 1                   | 2                                                      | 3                           | 4                    | 5                   | 6                    | 7    | 8                       | 9                     |
| 1                   | Введение в формальную семантику и верификацию программ | 4                           |                      |                     |                      |      |                         | устный опрос          |
| 2                   | Основы аксиоматической семантики Хоара                 | 8                           |                      |                     |                      |      |                         | собеседование         |
| 3                   | Семантика слабейших предусловий                        | 8                           |                      |                     |                      |      |                         | собеседование         |
| 4                   | Реляционная семантика Хоара                            | 8                           |                      |                     |                      |      |                         | коллоквиум            |
| 5                   | Типы данных в языках программирования                  | 6                           |                      |                     |                      |      |                         | собеседование         |
|                     | <b>Всего</b>                                           | <b>34</b>                   |                      |                     |                      |      |                         |                       |



## **ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **Перечень основной литературы**

1. Камкин А.С. Введение в формальные методы верификации программ. – Москва: МАКС Пресс, 2018. – 272 с.
2. Apt, K.R., Olderog, E.R. Fifty years of Hoare's logic. Form Asp Comp 31, 751–807 (2019).
3. Deductive Software Verification: Future Perspectives: Reflections on the Occasion of 20 Years of KeY. – Springer, 2020. – 587 p.
4. Logic-Based Program Synthesis and Transformation: 29th International Symposium, LOPSTR 2019, Porto, Portugal, October 8–10, 2019, Revised Selected Papers. – Springer, 2020. – 424 p.

### **Перечень дополнительной литературы**

1. Дейкстра Э. Дисциплина программирования. – М.: Мир, 1978. – 275 с.
2. Алагич С., Арбиб М. Проектирование корректных структурированных программ. – М.: Радио и связь, 1984. – 264 с.
3. Грис Д. Наука программирования. – М.: Мир, 1984. – 416 с.
4. Замулин А.В. Типы данных в языках программирования и базах данных. – Новосибирск: Наука, 1987. – 152 с.
5. Калинин А. Г., Мацкевич И. В. Универсальные языки программирования. Семантический подход. – М.: Радио и связь, 1991. – 400 с.
6. Hoare C.A.R., He Jifeng. Unifying theories of programming. – New York, Prentice-Hall, 1998. – 311 p.
7. В.А. Непомнящий, О.М. Рякин. Прикладные методы верификации программ. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.

## **Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки**

Для диагностики компетенций используются следующие формы:

1. Устная форма: собеседование, коллоквиум; устный опрос;

Формой текущей аттестации по дисциплине «Формальная семантика и верификация программ» учебным планом предусмотрен зачет.

При формировании итоговой оценки используется оценка знаний студента, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения. Итоговая оценка предусматривает использование весовых коэффициентов для текущего контроля знаний и текущей аттестации студентов по дисциплине.

Примерные весовые коэффициенты, определяющие вклад текущего контроля знаний в итоговую оценку:

1. коллоквиум – 20%;
2. устный опрос – 20 %;
3. собеседование – 60 %;

Итоговая оценка по дисциплине рассчитывается на основе оценки текущей успеваемости.

### ***Рекомендуемая тематика коллоквиума:***

1. Коллоквиум «Аксиоматическая и реляционная семантика Хоара».
2. Коллоквиум «Формальная семантика языков программирования и методы верификации»

Текущий контроль знаний проводится в соответствии с учебно-методической картой дисциплины.

## **Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины**

При организации образовательного процесса используются ***метод анализа конкретных ситуаций (кейс-метод)***.

*Кейс-метод* предполагает:

- приобретение студентом знаний и умений для решения практических задач в области формальной семантики языков программирования и методов верификации программного обеспечения;
- анализ ситуации, используя профессиональные знания, собственный опыт, дополнительную литературу и иные источники по теме дисциплины.

## **Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся**

Для организации самостоятельной работы студентов по учебной дисциплине следует использовать современные информационные ресурсы: разместить на образовательном портале комплекс учебных и учебно-методических материалов (учебно-программные материалы, учебное издание для теоретического изучения дисциплины, методические указания к лабораторным занятиям, материалы текущего контроля и текущей аттестации, позволяющие определить соответствие учебной деятельности обучающихся требованиям образовательных стандартов высшего образования и учебно-программной документации, в т.ч. вопросы для подготовки к зачету, задания, тесты, вопросы для самоконтроля, тематика рефератов и др., список рекомендуемой литературы, информационных ресурсов и др).

### **Примерный перечень вопросов к зачету**

1. Роль и значение формальных методов спецификации и верификации программ.
2. Роль математических методов в инженерных и научных дисциплинах.
3. Общая постановка задач верификации и синтеза программ.
4. Понятие о семиотике. Синтаксический, семантический и прагматический уровни знаковой системы.
5. Специфика программирования как знаковой системы.
6. Операционная, денотационная и аксиоматическая семантики.
7. Хоаровские тройки. Предусловия и постусловия. Частичная и полная корректность. Свойства.
8. Семантика пустой, зависающей и хаотической программ.
9. Семантика оператора присваивания. Семантика операции ветвления.
10. Правило вывода для оператора цикла. Понятие инварианта цикла. Проблема завершимости цикла.
11. Слабейшее предусловие как точная нижняя грань всех предусловий и его свойства.
12. Дистрибутивность относительно конъюнкции и дизъюнкции.
13. Слабейшее свободное постусловие, семантика частичной корректности и пустой оператор.
14. Операторы присваивания, операторы последовательного выполнения и ветвления в терминах слабейшего предусловия.
15. Понятие неподвижной точки. Неподвижные точки в полных решётках.
16. Оператор цикла как неподвижная точка и предел последовательности условных операторов.
17. Моделирование поведения программ с помощью отношений.
18. Законы и антиномии реляционной семантики.
19. Операционная семантика и вопросы реализации.

- 20. Моделирование выполнения программ в реляционной семантике.
- 21. Тип данных как множество значений с совокупностью операций.
- 22. Абстрактные типы данных.
- 23. Аксиоматические теории типов данных

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

| Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование                  | Название кафедры            | Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине | Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Разработка программного обеспечения на основе стека технологий Enterprise Java | Технологий программирования | Нет                                                                                                           | Оставить содержание учебной дисциплины без изменения, протокол № 16 от 28.05.2021                |
| Разработка системного программного обеспечения                                 | Технологий программирования | Нет                                                                                                           | Оставить содержание учебной дисциплины без изменения, протокол № 16 от 28.05.2021                |

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО  
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

на \_\_\_\_ / \_\_\_\_ учебный год

| №<br>п/п | Дополнения и изменения | Основание |
|----------|------------------------|-----------|
|          |                        |           |

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры  
\_\_\_\_\_ (протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 201\_ г.)

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета

\_\_\_\_\_