

03

## Валидация подходов к решению осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса и вихреразрешающих методов при исследовании аномальной интенсификации турбулентного отрывного течения на стабилизированном гидродинамическом участке структурированного канала с двухрядными наклонными канавками

© С.А. Исаев<sup>1,2</sup>, А.Ю. Чулюнин<sup>3</sup>, М.С. Грицкевич<sup>1</sup>, Е.А. Никущенко<sup>1</sup>, Н.И. Михеев<sup>4</sup>, Н.С. Душин<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>4</sup> Казанский научный центр РАН, Казань, Россия

E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступило в Редакцию 7 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 4 декабря 2025 г.

Принято к публикации 4 декабря 2025 г.

Полученные с помощью решения осредненных уравнений Навье—Стокса и использования одного из вариантов метода отсоединенных вихрей численные прогнозы характеристик турбулентного отрывного течения в наклонных канавках в двухрядных плотных пакетах в структурированном канале на стабилизированном участке сопоставлены между собой и с результатами численного и физического моделирования в длинном оптически прозрачном канале с 26 канавками в каждом ряду. Их приемлемое согласие подтверждает ускорение потока в ядре структурированного канала с ростом максимальной скорости в 1.3 раза по сравнению со случаем плоскопараллельного канала.

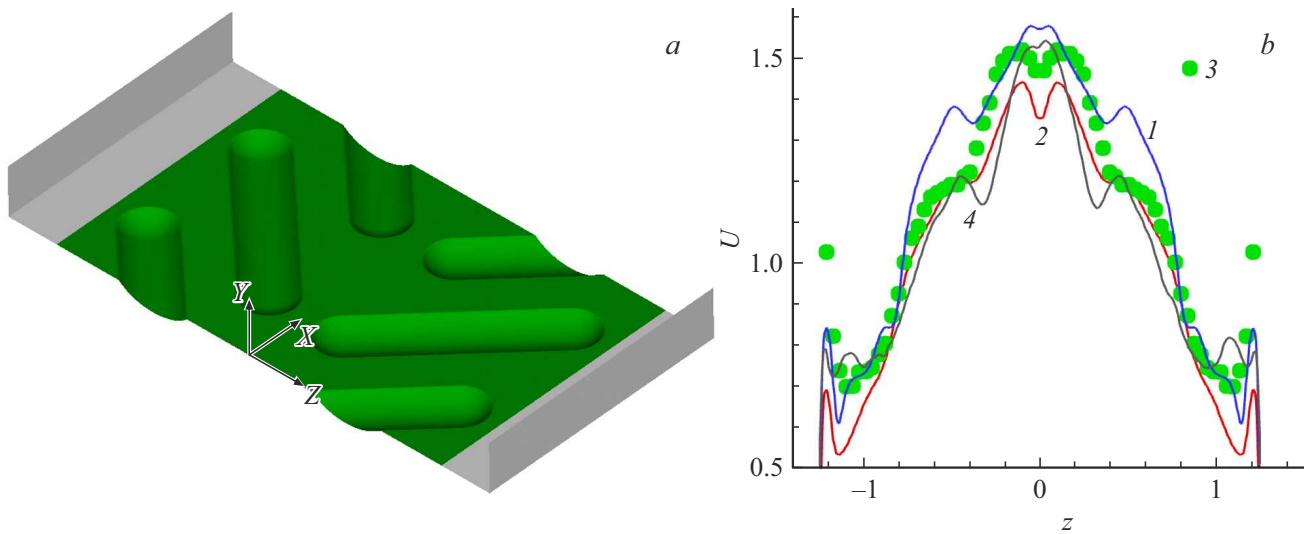
**Ключевые слова:** поля скорости, структурированный канал, наклонные канавки, ускорение потока в ядре, RANS, IDDES.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.07.62517.20564

Эффект аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена (АИОТТ) в наклонных канавках численно установлен на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса (RANS) на стабилизированном участке структурированного узкого канала [1]. Он связан с экстраординарными перепадами статического давления во входной части канавки [2] и сопровождается многократным возрастанием относительных величин отрицательного трения и числа Нуссельта внутри отрывной области течения [3]. Выбор полуэмпирической SST-модели турбулентности для RANS-расчета интенсификации смерчеобразного течения в наклонных канавках на стабилизированном участке структурированного канала обоснован в [3], а ее валидация проведена при анализе связанного с АИОТТ эффекта ускорения потока в ядре длинного оптически прозрачного канала с двухрядными канавками под углами наклона  $\pm 45^\circ$  при сопоставлении измеренных методом SIV и рассчитанных профилей продольной скорости [4]. Остается злободневным вопрос о применении для расчета турбулентного отрывного течения вихреразрешающих методов, подобных использованным в [5] для моделирования обтекания сферической лунки на стенке канала. В настоящей работе он

получил разрешение при рассмотрении периодического модуля в структурированном канале с двухрядными наклонными канавками — компьютерном аналоге элемента экспериментального стенда в КазНЦ РАН [4]. Следует отметить, что в перечне представленных в [6] современных подходов к моделированию турбулентных течений особое место занимает метод моделирования отсоединенных вихрей (DES). Здесь сопоставлены результаты расчетов с помощью RANS-SST и разновидности DES (IDDES) между собой для периодического модуля, а также с численными прогнозами и данными экспериментов на стабилизированном участке длинного канала с 26 канавками в каждом ряду [4].

Аналогично [3] рассматривается участок стабилизированного турбулентного воздушного течения и теплообмена в канале высотой  $H$  с двухрядными наклонными канавками, подобными представленным в [4]. На участке изотермической структурированной стенки, на боковых теплоизолированных, нижней и верхней изотермических стенках задаются условия прилипания, а на проточных входных и выходных границах — условия периодичности. Все линейные размеры отнесены к  $H$ . Расчетный периодический модуль канала имеет высоту 1, длину 5.06



**Рис. 1.** Периодический модуль в узком структурированном канале с двухрядными наклонными канавками (а) и сравнение поперечных профилей продольной декартовой составляющей скорости  $U(z)$  в срединном сечении модуля на высоте  $y = 0.23$  от нижней стенки канала (б). 1 — расчеты RANS в периодическом модуле, 2 — расчеты RANS в длинном канале в центральном сечении 22-й канавки, 3 — эксперименты в КазНИЦ РАН в длинном канале в центральном сечении 22-й канавки, 4 — расчеты IDDES в периодическом модуле.

и ширину 10. На нижней стенке располагаются два ряда канавок глубиной 0.25 с продольным шагом между центрами 2.53 (рис. 1, а). Верхняя стенка поддерживается при характерной температуре  $T$ , равной 1 (размерная величина 293 К). Канавки шириной 1 сочетают в себе два полусферических фрагмента, соединенных цилиндрической траншеей длиной 3.5, с наклоном  $\pm 45^\circ$  по отношению к срединному сечению модуля. Радиус скругления кромки  $R$  варьируется от 0 до 0.1. Нижняя структурированная стенка нагревается до 303 К. Число Рейнольдса, определенное по характерной среднemasсовой скорости потока  $U_0$  и  $H$ , задается равным 4300 и соответствует эксперименту [4]. Декартова система координат  $x, y, z$  привязана к середине нижней стенки канала во входном сечении, а оси ориентируются вдоль канала, в вертикальном и поперечном направлениях. Декартовы составляющие скорости  $U, V, W$  отнесены к характерной скорости  $U_0$ , энергия турбулентности  $K$  — к  $U_0^2$ , а турбулентная вязкость — к  $U_0 H$ . На стенках задается условие прилипания. Число Нуссельта  $Nu$  определяется по градиенту температуры на стенке и перепаду между температурой стенки и среднemasсовой температурой в соответствующем поперечном сечении канала. Число Нуссельта  $Nu_m$  проинтегрировано по контрольному участку стенки с канавками длиной 5.06 и шириной 8. Коэффициент гидравлических потерь  $\xi$  определяется по методике между входным и выходным сечениями периодического модуля [6]. Характеристики с индексом  $pl$  берутся в точках плоскопараллельного канала, соответствующих проекциям криволинейной структурированной стенки канала.

Как и в [3,4], численное моделирование турбулентного воздушного течения и теплообмена в периодическом

модуле канала с двухрядными канавками проводится на основе решения записанных для несжимаемой жидкости осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса и энергии [7]. Система уравнений замыкается с помощью модели переноса сдвиговых напряжений, которая модифицирована с учетом кривизны линий тока в рамках подхода Роди—Лещинера—Исаева [7]. Стационарные уравнения в линеаризованной форме решаются с использованием многоблочных вычислительных технологий и разномасштабных структурированных сеток с их частичным пересечением. Вводятся декартова сетка в периодической секции канала и криволинейная косоугольная сетка в пристеночном слое, согласованная с поверхностью канавки. Общее количество ячеек сетки варьируется от порядка 1 до 7 млн. Продольные и поперечные шаги сеток на структурированной стенке изменяются от 0.04 до 0.1. Пристеночные шаги задаются равными  $(1-2.5) \cdot 10^{-4}$ , причем размер  $2.5 \cdot 10^{-4}$  соответствует  $y^+ = 1$ . Применяются процедуры коррекции градиента давления и среднemasсовой температуры, реализованные в пакете VP2/3 (Velocity—Pressure, 2D/3D) [7].

Также для моделирования периодического турбулентного течения жидкости в модуле с  $R = 0$  (рис. 1, а) используется вихреразрешающий подход Improved Delayed Detached Eddy Simulation (IDDES) [8]. Расчет пристеночного течения при этом осуществляется с помощью SST-модели турбулентности [9]. На входе и выходе из модуля задаются периодические граничные условия при сохранении массового расхода, а на стенках канала и поверхностях канавок — условие прилипания. Разбиение расчетной области на контрольные объемы выполнено с использованием ячеек гексагонального типа. Размер

ячейки в ядре потока составляет 0.0185, а в окрестности канавок — 0.00938. Для корректного описания течения вблизи твердых стенок применяется призматический слой ячеек, при этом высота первой ячейки выбрана так, чтобы безразмерный параметр  $y^+ < 1$ . Общий размер сеточной модели составляет около 10.4 млн элементов. При нестационарном решении задачи дискретизация по времени осуществляется с использованием неявной схемы второго порядка. Шаг по времени  $\tau$  составляет 0.005, что обеспечивает выполнение условия по числу Куранта  $Co < 1$ . Для дискретизации конвективных членов используется гибридная центрально-разностная схема BCD с коэффициентом смещения 0.5. Для корректного сравнения с результатами RANS-расчета после достижения момента времени  $t = 150$  инициируется процедура осреднения решения, которая продолжается до момента  $t = 300$ .

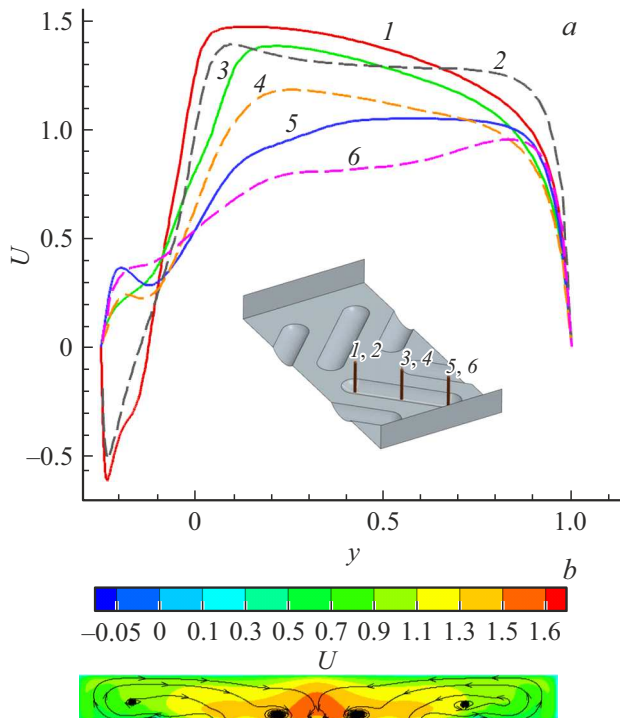
На рис. 1–3 представлены некоторые из полученных результатов. В табл. 1 обосновывается сеточная сходимость RANS-решений при  $R = 0.02$  и  $0.1$  при сравнении результатов расчетов теплогидравлических характеристик  $Nu_m$  и  $\xi$  для сеток различной густоты. В табл. 2 сопоставляются экстремальные величины декартовых составляющих скорости  $U$ ,  $V$ ,  $W$  в периодическом модуле канала с двухрядными канавками, определенные

в рамках подходов RANS и IDDES. Представленные характеристики хорошо согласуются, причем наиболее близкими оказались коэффициенты гидравлических потерь. Следует отметить, что тепловая эффективность в структурированном канале на стабилизированном участке равна 2.85 при двукратном росте относительных гидравлических потерь  $\xi/\xi_{pl}$ . Величина  $U_{max}$  в плоскопараллельном канале равна 1.23.  $U_{max}$  в ядре турбулентного потока в структурированном канале возрастает в 1.3 раза по сравнению со значением в плоскопараллельном канале, скорость возвратных токов приближается к 0.7, а скорости закрученных потоков в наклонных канавках превосходят 1. Максимальные скорости восходящих и нисходящих потоков внутри канавок приближаются к 0.6 и 0.4 соответственно. Таким образом, оба метода численного моделирования демонстрируют достижение в наклонной канавке ультравысоких скоростей возвратного и вторичного закрученного потока, характерного для АИОТТ.

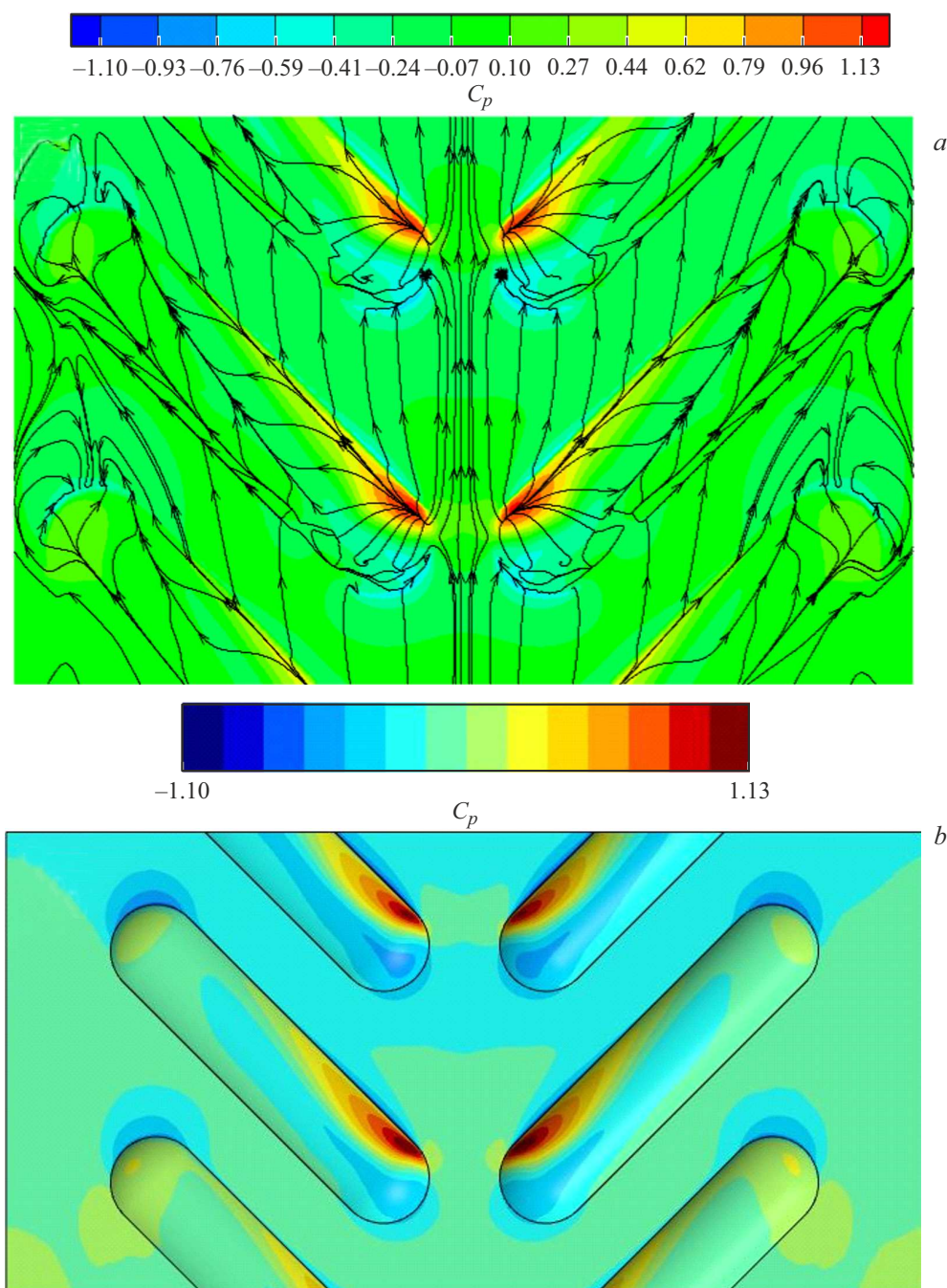
Как видно из рис. 1, *b*, RANS-прогнозы поперечного профиля скорости  $U(z)$  в центре 22-й канавки в длинном канале [4] хорошо согласуются с RANS-прогнозами  $U(z)$  в центре периодического модуля и данными экспериментальных измерений, что свидетельствует о стабилизации потока на рассматриваемом участке канала. Полученные IDDES-результаты совпадают с приемлемой точностью с экспериментальными данными и RANS-прогнозами, хорошо отображая профиль  $U(z)$  в центральной зоне канала и в окрестности стенок.

Сравнение рассчитанных методами RANS и IDDES профилей скорости  $U(y)$  в трех характерных точках наклонной канавки на входном, срединном и выходном участках в периодическом модуле также показывает их удовлетворительное согласие. Оно демонстрирует перестройку профилей внутри канавки и ослабление интенсивности потока в ядре при приближении к боковой стенке (рис. 2, *a*). Во входной части наклонной канавки минимальная скорость возвратных токов снижается до  $-0.6$ , а максимальная скорость потока в ядре достигает 1.47. Важно подчеркнуть, что на уровне стенки продольная составляющая скорости течения существенно превышает среднемассовую скорость и составляет 1.24, т.е. пристеночный слой над канавкой значительно утончается. Линии токов вторичного течения в центральном сечении модуля, нанесенные на поле скорости  $U(z, y)$ , показывают формирование спиралеобразных вихревых структур в центральной зоне канала (рис. 2, *b*).

Сравнение рассчитанных методами RANS и IDDES полей коэффициентов давления  $C_p$  на структурированной стенке стабилизированного участка канала демонстрирует их приемлемое согласие по максимальным и минимальным (отрицательным) величинам (рис. 3). Картины растекания на рис. 3, *a* отображаются линиями тока в пристеночном слое на расстоянии  $y = 0.00005$  от стенки, показывают формирование зон возвратных токов и экстраординарных перепадов



**Рис. 2.** Сравнение рассчитанных с помощью RANS (1, 3, 5) и IDDES (2, 4, 6) профилей  $U(y)$  в центрах сечений перехода от концевых сферических сегментов к траншейной части, а также в центре наклонной канавки периодического модуля структурированного канала (*a*) и рассчитанное с помощью RANS поле  $U(y, z)$  в срединном сечении модуля с нанесенными линиями тока вторичного течения (*b*).



**Рис. 3.** Сравнение полей коэффициента давления на структурированной стенке периодического модуля канала, рассчитанных с помощью RANS с нанесенными картинками линий тока в пристеночном слое (a) и IDDES (b).

давления между зонами торможения на наветренных склонах канавок и разрежения в местах генерации смерчеобразных структур (с отрицательным избыточным давлением).

Приемлемое согласие результатов RANS-SST- и IDDES-расчетов между собой для периодического модуля и с данными экспериментов КазНЦ РАН на стабилизированном участке длинного канала с 26 наклонными канавками в двухрядном пакете на стенке подтверждает достоверность эффекта аномальной интенсификации от-

рывного течения в канавках и ускорения потока в ядре структурированного канала.

#### Финансирование работы

Исследования выполнены в рамках госзадания 075-03-2025-584 от 27.01.2025 г.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

**Таблица 1.** Рассчитанные с помощью RANS теплогидравлические характеристики структурированных каналов при использовании сеток различной густоты

$N \cdot 10^{-6}$	$R$	$Nu_m$	$\xi$
1.08	0.1	34.3	0.0414
2.2	0.1	34.5	0.0424
6.6	0.02	37.4	0.0426
Фрагмент плоскопараллельного канала	—	13.1	0.0205

**Таблица 2.** Сравнение экстремальных характеристик отрывного течения в структурированном канале

Подход	$U_{\max}$	$U_{\min}$	$V_{\max}$	$V_{\min}$	$W_{\max}$	$W_{\min}$
RANS	1.61	−0.701	0.563	−0.426	1.046	−1.046
IDDES	1.59	−0.645	0.622	−0.393	1.061	−1.056

## Список литературы

- [1] S. Isaev, M. Gritckevich, A. Leontiev, I. Popov, *Acta Astron.*, **163** (A), 202 (2019). DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.01.033
- [2] С.А. Исаев, С.В. Гувернюк, Д.В. Никущенко, А.Г. Судаков, А.А. Синявин, Е.Б. Дубко, *Письма в ЖТФ*, **49** (15), 39 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.15.55863.19560 [S.A. Isaev, S.V. Guvernyuk, D.V. Nikushchenko, A.G. Sudakov, A.A. Sinyavin, E.B. Dubko, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (8), 33 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.08.56684.19560].
- [3] S.A. Isaev, A.Yu. Chulyunin, D.V. Nikushchenko, A.G. Sudakov, A.E. Usachov, *High Temp.*, **59** (1), 106 (2021). DOI: 10.1134/S0018151X21010041
- [4] S.A. Isaev, N.I. Mikheev, N.S. Dushin, A.E. Goltsman, D.V. Nikushchenko, A.G. Sudakov, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2119**, 012016 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2119/1/012016
- [5] J. Turnow, R. Kasper, N. Kornev, *Comp. Fluids*, **172**, 720 (2018). DOI: 10.1016/j.compfluid.2018.01.014
- [6] А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, А.К. Травин, М.Л. Шур, *Современные подходы к моделированию турбулентности* (Изд-во Политехн. ун-та, СПб., 2016).
- [7] С.А. Исаев, П.А. Баранов, А.Е. Усачов, *Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике* (LAP LAMBERT Academic Publ., Саарбрюкен, 2013).
- [8] M.L. Shur, P.R. Spalart, M.K. Strelets, A.K. Travin, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **29**, 1638 (2008). DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001
- [9] F.R. Menter, M. Kuntz, in *The aerodynamics of heavy vehicles: trucks, buses, and trains*, ed. by R. McCallen, F. Browand, J. Ross. *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics* (Springer, Berlin–Heidelberg, 2004), vol. 19, p. 339–352. DOI: 10.1007/978-3-540-44419-0\_30