

Литература

1. Сайт «Mercurial SCM». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mercurial.selenic.com>.
2. Сайт «Extensible Markup Language (XML)». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.w3.org/XML>.
3. Сайт «PostgreSQL». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.postgresql.org>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ КОММЕРЧЕСКИХ CFD-КОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

В. Р. Низамутдинов, С. Л. Осипов, И. С. Прокопцов, С. А. Рогожкин

ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения
им. И. И. Африкантова», г. Нижний Новгород

Введение

В моделях турбулентности, реализованных в большинстве Computational Fluid Dynamics (CFD) программных комплексах (ANSYS CFX, STAR-CCM+, FlowVision, Fluent и др.), для учета теплопереноса используется аналогия Рейнольдса – аналогия между теплообменом и переносом количества движения в турбулентном потоке. В жидких металлах вследствие большой теплопроводности и малой вязкости распределение полей скорости и температуры существенно различаются друг от друга. Таким образом, теплоперенос в средах с $Pr \ll 1$ (например, жидкие металлы) существенно отличается от механизма теплопереноса в средах с $Pr \sim 1$ (воздух, вода и др.) и использование моделей турбулентности с аналогией Рейнольдса для моделирования теплогидравлических процессов с натриевым теплоносителем может привести к некорректным результатам.

В данной работе представлены результаты численного моделирования течения натрия в круглой трубе с помощью коммерческих CFD-кодов: ANSYS CFX, STAR-CCM+, FlowVision и их сравнение с аналитическим решением.

Расчетная схема

В задаче моделируется развитое турбулентное течение жидкометаллического теплоносителя (натрия) в круглой трубе. Расчетная схема (рис. 1) состоит из двух участков. Первый участок – адиабатический (длина $l_1 = 40d$), принимается для формирования профиля скорости в трубе при численном моделировании течения, на втором участке (длиной $l_2 = 10d$) поддерживается постоянная температура стенки $t_c = 150$ °С. Температура теплоносителя на входе в трубу принимается равной $t_{вх} = 550$ °С. В результате решения определяется средняя температура теплоносителя на выходе из трубы $t_{вых}$ при варьировании критерия Пекле (Pe) от 300 до 10000 (путем изменения расхода на входе в трубу G), в соответствии с областью применения формулы для расчета критерия Нуссельта $Nu = 5 + 0,025Pe^{0,8}$ [1], используемой в аналитическом решении.

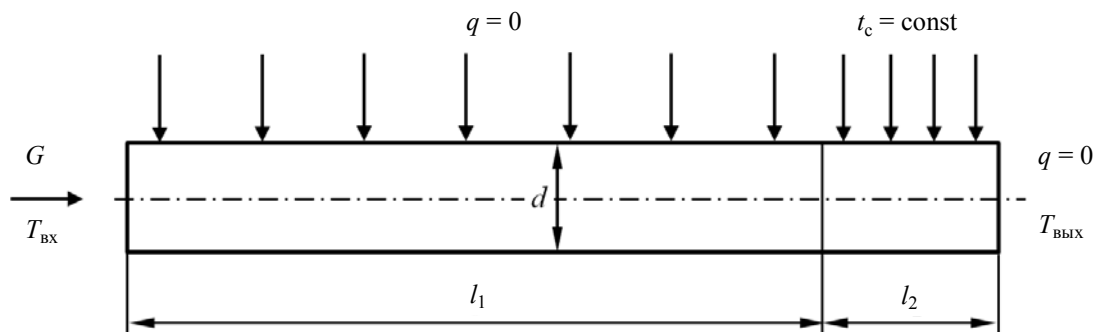


Рис. 1. Расчетная схема задачи: течение теплоносителя в трубе с охлаждением

Аналитическое решение

Результаты аналитического решения по средней выходной температуре теплоносителя получены по нижеприведенной методике.

Средняя температура теплоносителя на выходе из трубы определяется по формуле [2]:

$$T_{OUT} = T_{IN} - (T_{IN} - T_W) \left(1 - e^{-\frac{KF}{W}} \right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где T_{IN} – температура на входе в трубу, $^\circ\text{C}$; T_W – наружная температура стенки трубы, $^\circ\text{C}$; K – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; F – площадь поверхности теплообмена, м^2 ; W – теплоемкость массового расхода, $\text{Вт}/^\circ\text{C}$.

Теплоемкость массового расхода определяется по формуле:

$$W = GCp, \quad (2)$$

где G – массовый расход среды, $\text{кг}/\text{с}$; Cp – удельная теплоемкость среды, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

Площадь поверхности теплообмена определяется по формуле:

$$F = \pi l d_{IN}, \text{ м}^2. \quad (3)$$

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{d_{IN}}{2\lambda_c} \ln\left(\frac{d_{OUT}}{d_{IN}}\right)}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}), \quad (4)$$

где d_{IN} – внутренний диаметр трубы, м ; d_{OUT} – наружный диаметр трубы, м ; λ_c – коэффициент теплопроводности трубы, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; α – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к трубе для развитого турбулентного течения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Так как сопряженная задача не рассматривается и температура задается на внутренней поверхности стенки трубы, формула (4) принимает вид:

$$K = \alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}). \quad (5)$$

Формулу для средней температуры на выходе (1) можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 T_{OUT} &= T_{IN} - (T_{IN} - T_W) \left(1 - e^{-\frac{KF}{W}} \right) = T_{IN} - (T_{IN} - T_W) \left(1 - e^{-\frac{\alpha \pi d l}{c_p \rho v \pi (d^2/4)}} \right) = \\
 &= T_{IN} - (T_{IN} - T_W) \left(1 - e^{-4 \frac{\alpha d l}{\lambda} \frac{\lambda}{d} \frac{\mu}{c_p \rho v d}} \right) = T_{IN} - (T_{IN} - T_W) \left(1 - e^{-4 \frac{l}{d} \frac{Nu}{Re Pr}} \right) = \\
 &= T_{IN} - (T_{IN} - T_W) \left(1 - e^{-4 \frac{l}{d} \frac{Nu}{Pe}} \right), \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Критерий Нуссельта для турбулентного режима течения натрия в трубе при $Pe > 300$ определяется по формуле [1]:

$$Nu = \left(5 + 0,025 Pe^{0,8} \right) 1,72 \left(\frac{d_{IN}}{l} \right)^{0,16}, \tag{7}$$

где Pe – критерий Пекле; l – длина трубы, м; $1,72 \left(\frac{d_{IN}}{l} \right)^{0,16}$ – поправочный множитель при $l/d < 30$.

Критерий Пекле определяется по формуле:

$$Pe = Pr \cdot Re. \tag{8}$$

Численное моделирование

Моделирование процесса тепломассопереноса в жидкометаллическом теплоносителе проводилось по трем программным комплексам: ANSYS CFX, STAR-CCM+ и FlowVision с применением к-ε модели турбулентности, при этом теплоперенос рассчитывался в рамках аналогии Рейнольдса. Также были выполнены расчеты по программе FlowVision с использованием специально разработанной модели турбулентного теплопереноса LMS (Liquid Metal Sodium) [3, 4], предназначенной для учета специфики теплопереноса натриевого теплоносителя. Модель LMS включает в себя уравнения теплопереноса в турбулентном потоке, выражение для турбулентного числа Прандтля, поправку, учитывающую гравитационную анизотропию в тепловом потоке, тепловую пристеночную функцию. Модель совместима со всеми разработанными в программном комплексе FlowVision к-ε моделями турбулентности и применима как в высокорейнольдсовых (с пристеночными функциями), так и в низкорейнольдсовых (без пристеночных функций) расчетах течения натрия.

Для решения данной задачи в программных комплексах созданы полномасштабные расчетные модели трубы. Сетки построены со сгущением к боковой поверхности. Среднее количество элементов в расчетных сетках ANSYS CFX, STAR-CCM+ и FlowVision составляют, соответственно, около 850, 440 и 470 тыс. ячеек. Фрагменты расчетных сеток представлены на рис. 2.



Рис. 2. Фрагменты расчетных сеток

Результаты расчета

Задача решается с натриевым теплоносителем. Теплофизические характеристики теплоносителя принимаются постоянными и соответствующими температуре 550 °С.

Изменение средней температуры натрия на выходе из трубы в зависимости от критерия Пекле представлено на рис. 3. Как видно из рисунка, результаты, полученные в ПК FlowVision с использованием специально разработанной для натриевого теплоносителя модели турбулентного теплопереноса LMS, существенно лучше согласуются с аналитическим решением.

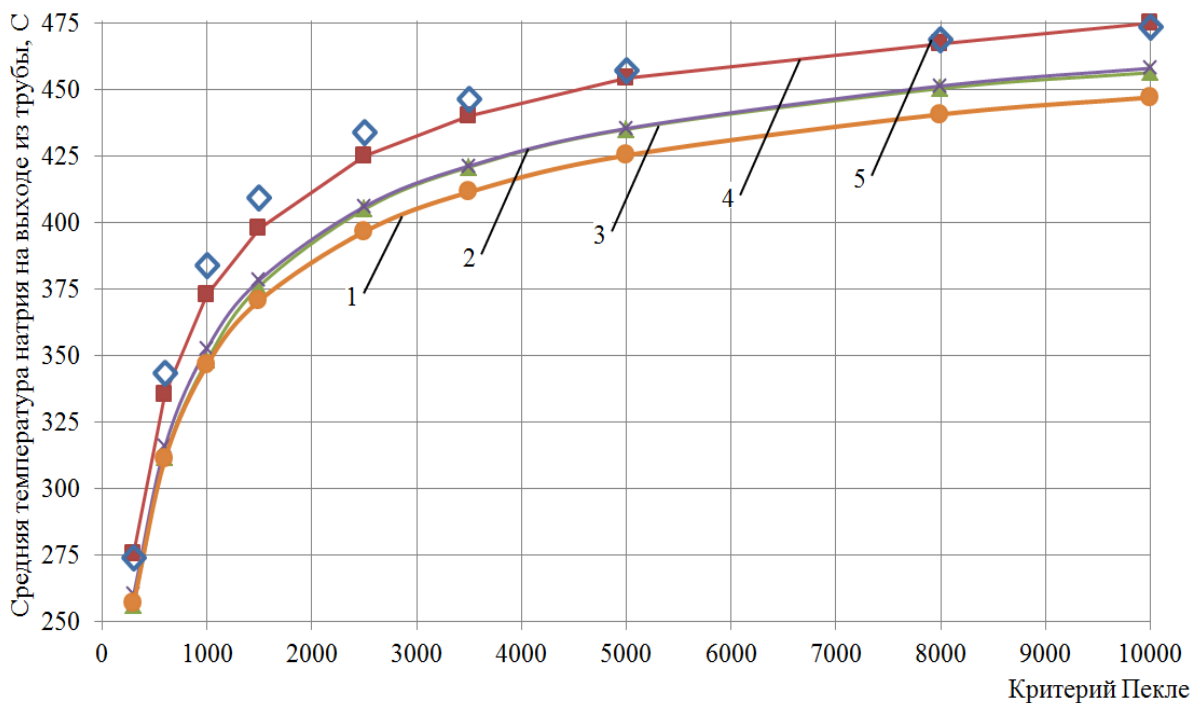


Рис. 3. Средняя температура натрия на выходе из трубы: ANSYS CFX (1), FlowVision (2), STAR-CCM+ (3), FlowVision с LMS (4), аналитическое решение (5)

На рис. 4 представлены зависимости погрешности средней температуры на выходе из трубы, полученные с помощью CFD-кодов, от критерия Пекле при сравнении с аналитическим решением.

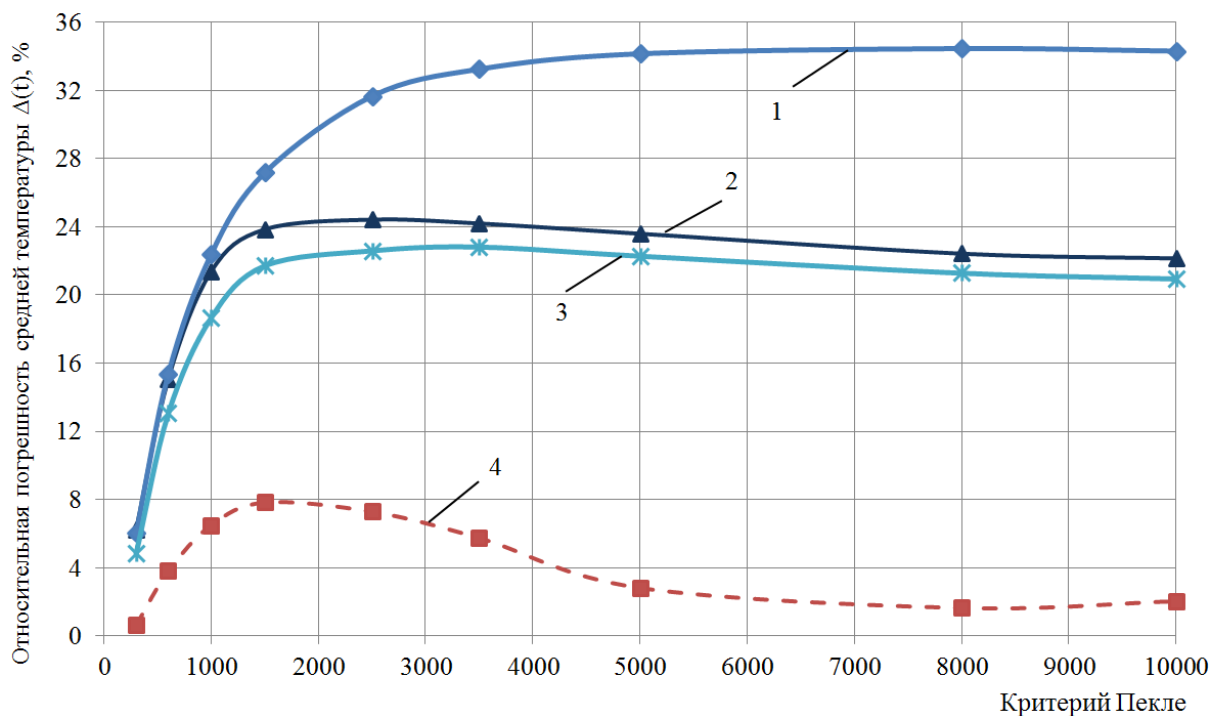


Рис. 4. Погрешность расчета средней температуры на выходе из трубы по программам ANSYS CFX (1), FlowVision (2), STAR-CCM+ (3), FlowVision с LMS (4)

Оценка относительной погрешности средней температуры на выходе из трубы проводится по формуле:

$$\Delta = \frac{|T_a - T|}{|T_{a\max} - T_a|} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где T_a и T – значения температур, полученные по результатам аналитического расчета и расчета по кодам, соответственно; $T_{a\max}$ – максимальное значение температуры во всей области задачи.

Как видно из приведенных графиков, использование CFD-кодов ANSYS CFX, STAR-CCM+ и FlowVision (без LMS) при моделировании течения натрия в трубе приводит к большим погрешностям средней выходной температуры (до 34 %); применение модели турбулентного теплопереноса LMS в FlowVision позволяет существенно улучшить результаты расчетов для данного класса задач и достичь погрешности расчета по температуре не более 8 %.

Стоит отметить, что применение вышеперечисленных кодов для решения подобной задачи, но с использованием в качестве теплоносителя воды и сравнение с соответствующим аналитическим решением приводит к погрешности по выходной температуре не более 6 %.

Зависимости критерия Нуссельта от критерия Пекле представлены на рис. 5.

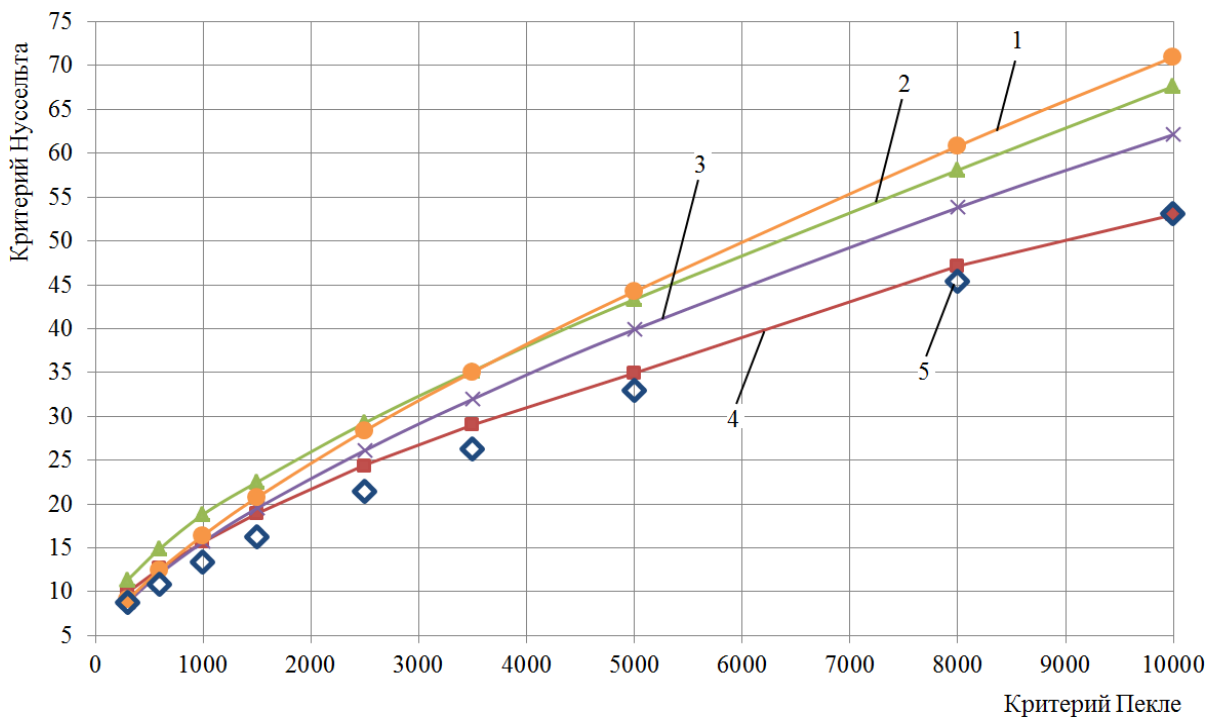


Рис. 5. Зависимость критерия Нуссельта от критерия Пекле: ANSYS CFX (1), FlowVision (2), STAR-CCM+ (3), FlowVision с LMS (4), аналитическое решение (5)

Как видно из графиков на рис. 5, критерий Нуссельта, определенный по программе FlowVision с LMS, достаточно хорошо описывает аналитическое решение и с увеличением критерия Пекле точность расчетов растет. Решение по ANSYS CFX, STAR-CCM+ и FlowVision без LMS дает хорошие результаты лишь в диапазоне чисел Пекле от 300 до 1000, в дальнейшем, с ростом критерия Пекле точность расчетов существенно снижается.

На рис. 6 приведены результаты расчета турбулентного числа Прандтля, полученные по программе FlowVision с использованием модели LMS. Из рисунка видно, что для натриевого теплоносителя турбулентное число Прандтля имеет переменное значение, которое значительно превышает величину 0,9, используемую по умолчанию в коммерческих CFD-кодах.

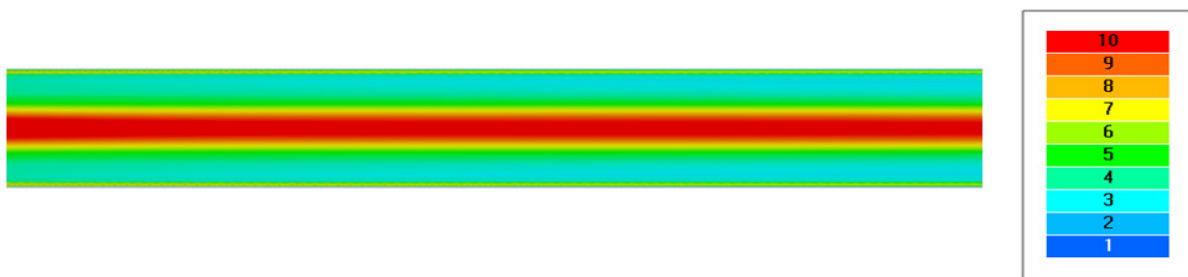


Рис. 6. Расчетное значение турбулентного числа Прандтля по ПК FlowVision

Заключение

Выполнено исследование применимости коммерческих CFD-кодов для моделирования процесса теплопереноса в жидкометаллическом теплоносителе. Решение задачи течения натриевого теплоносителя в круглой трубе по кодам ANSYS CFX, STAR-CCM+, FlowVision, где исполь-

зается аналогия Рейнольдса, дает существенное отклонение от аналитического решения, как по средней выходной температуре, так и по критерию Нуссельта. Учет специфики теплопереноса для натриевого теплоносителя с помощью специально разработанной модели LMS позволяет существенно улучшить результаты расчетов для данного класса задач.

Литература

1. Боришанский В. М. Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1967.
2. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.
3. Осипов С. Л., Рогожкин С. А., Фадеев И. Д. и др. Разработка модели LMS для учета турбулентного теплопереноса в натриевом теплоносителе и ее тестирование // Международный форум «Инженерные системы-2012»: Тез. докл. 2012. С. 21–22.
4. Осипов С. Л., Рогожкин С. А., Соболев В. А. и др. Численное моделирование теплогидравлических процессов в верхней камере быстрого реактора // Атомная энергия. 2013. Т. 115. Вып. 5. С. 295–298.

БИБЛИОТЕКА ЕФР КАК СРЕДСТВО ЭФФЕКТИВНОГО ДОСТУПА К ФАЙЛОВЫМ ДАННЫМ НА ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ И СУПЕРКОМПЬЮТЕРАХ

К. К. Олесницкая, И. А. Антипин, М. А. Петрова

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Введение

Освоение и эффективное использование вычислительных и файловых ресурсов многопроцессорных ЭВМ на базе перспективной архитектуры является одной из актуальных задач в математическом отделении ВНИИЭФ. Поэтому в рамках создания базового программного обеспечения, необходимого для проведения комплексного имитационного моделирования задач основной тематики и инженерных задач различных отраслей промышленности на многопроцессорных ЭВМ, реализована библиотека ЕФР [1]. Проблемно-ориентированная библиотека обеспечивает оперативный и эффективный масштабируемый доступ к файловым данным на многопроцессорных ЭВМ.

Библиотека используется в основных прикладных программных комплексах ВНИИЭФ, является составной частью программ общего сервиса (препроцессор, постпроцессор) и является неотъемлемым компонентом технологии проведения расчетов на вычислительных системах (ВС) ВНИИЭФ.

Библиотека ЕФР предоставляет единый функциональный интерфейс для работы с файловыми данными и единый формат представления расчетных данных, который позволяет сохранять все необходимые данные как для продолжения счета в рамках одного комплекса программ, так и для передачи в другой комплекс программ для полномасштабных последовательных расчетов.

Программы чтения-записи расчетных данных, реализованные средствами библиотеки ЕФР легко портируются между несовместимыми аппаратными платформами. Это достигается благодаря тому, что библиотека ЕФР при решении задач доступа к файловым данным использует реализацию с учетом стратегии оптимального использования аппаратных и файловых ресурсов конкретной ВС.