



УДК 004.925.3

В. А. ФРОЛОВ¹, мл. науч. сотр.; В. А. ГАЛАКТИОНОВ¹, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. отделом; М. А. ТРОФИМОВ², 3D-художник

СРАВНЕНИЕ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ СИСТЕМ РАСЧЕТА ГЛОБАЛЬНОГО ОСВЕЩЕНИЯ (ПО СОСТОЯНИЮ НА 2014 ГОД)

¹ФГБУН «Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН»

Россия, 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4. Тел.: (499) 250-79-95; frolov@gin.keldysh.ru

²ООО «Новый Диск»

Россия, 127018, г. Москва, ул. Полковая, д. 3. Тел.: (495) 785-65-13; эл. почта: region@nd.ru

Ключевые слова: глобальное освещение, рендер-системы, сравнение, CPU, GPU.

В статье представлен сравнительный анализ производительности современных рендер-систем. Проведено сравнение среди 7 наиболее популярных продуктов для 3D Studio Max (Mental Ray, IRay, VRay3, VRayRT3, Corona, Octane, Hydra) на скорость интегрирования освещения для 7 различных сценариев. На основе проведенного исследования были сделаны выводы о современном положении дел в области рендер-систем, преимуществах и недостатках CPU и GPU реализаций, а также о достоинствах и недостатках различных алгоритмов, применяемых в исследуемых системах и возможных векторах развития. Рендер-системы были ранжированы по очкам относительной производительности для каждого из сценариев и в сумме. Наши тестовые сцены и данные находятся в открытом доступе.

В представленной работе нас, прежде всего, интересовало сравнение законченных реализаций в целом в промышленном решении в противовес сравнению отдельных алгоритмов в одной и той же системе. Мы постарались ответить на некоторые важные вопросы: что на практике дают последние достижения в области алгоритмов, такие как SPPM [1] и VCM [2]? Есть ли выигрыш от GPU? Смещенные и несмещенные рендер-системы: что и когда лучше? Какие алгоритмы несут наибольшую практическую пользу?

Сравнение современных рендер-систем – нетривиальная задача, встречающая определенный ряд сложностей.

Во-первых, недостаточно сравнить системы на одной или двух сценах, поскольку существует достаточно большое число причин, по которым расчет освещения может стать медленным. Необходимо покрытие достаточно широкого спектра сценариев. Во-вторых, во время проведения сравнения необходимо добиваться максимально возможного совпадения условий освещения, поскольку даже незначительное различие в условиях освещения может серьезно влиять на производительность. Например, едва заметное для глаза (из-за гамма-коррекции) увеличение яркости источника освещения в 1,5 раза может вызывать увеличение времени синтеза изображения до 2 раз, поскольку скорость сходимости метода Монте-Карло пропорциональна квадрату времени расчета, а яркость источника напрямую влияет на абсолютное значение ошибки метода Монте-Карло. В-третьих, системы, использующие смещенное решение (такие как Mental Ray, VRay и Hydra), не всегда позволяют напрямую регулировать время синтеза и точность получаемого изображения, что чрезвычайно усложняет процесс получения изображения с заданным качеством или временем. Огромное число настроек различных алгоритмов в этих системах создает простор для экспериментов, и опытный пользователь может добиться значительно более быстрого и точного синтеза, чем новичок. Наконец, рендер-системы не идентичны по набору функциональ-



ности моделям материалов и источников света. Например, источник типа «небесный портал» (Sky Portal), позволяющий корректно значительно ускорить расчет дневного освещения в помещениях, реализован не во всех системах.

Рендер-системы:

1) VRay и Mental Ray

Mental Ray – один из пионеров среди систем рендеринга со смешенным решением [3]. Со временем система не потеряла популярность и продолжает активно развиваться. Используется преимущественно в мультиплексии. Ключевой особенностью системы является высокая степень гибкости, позволяющая дизайнеру настроить расчет в нужной точности. Ключевыми алгоритмами расчета являются кэш освещенности в сочетании с финальным сбором, использующим фотонные карты [3]. Алгоритм интерполяции освещенности интересен тем, что использует не строго ближайшие точки, как в классической реализации кэша освещенности, а фильтрует освещение, учитывая многие точки. Mental также может использовать фотонные карты для расчета каустиков.

VRay [4] является одной из наиболее популярных рендер-систем в архитектуре. VRay – CPU рендер со смешенным решением. Ключевыми алгоритмами являются кэш освещенности (называемый в VRay термином «Irradiance Maps») и карты светимости (называемые в VRay термином «Light Cache»). Каустики в VRay могут рассчитываться при помощи фотонных карт. Для сравнения была использована новейшая версия VRay 3.0.

2) IRay, VRayRT, Octane

IRay является гибридной CPU/GPU рендер-системой с несмешенным решением, частично совместимой с Mental Ray. IRay использует GPU для ускорения трассировки лучей [5]. Исходя из документации, в IRay реализован один из вариантов алгоритма переноса света Метрополиса.

VRayRT – частично совместимая с VRay GPU рендер-система с несмешенным решением. В системе реализована только простая Монте-Карло трассировка путей. Эффективный расчет каустик невозможен.

Система Octane [6] является одной из первых рендер-систем с несмешенным решением, реализованная полностью на GPU. В Octane реализован метод PMC [7].

3) Corona и Hydra

Corona [8] – CPU рендер-система со смешенным и несмешенным решениями дебютировала в 2012 году. В отличие от VRay и Mental Ray, Corona использует кэш освещенности только для третьего переотражения, выполняя таким образом попиксельно финальный сбор. Отличительной чертой системы Corona является алгоритм Vertex Connection Merging (VCM) [2], значительно ускоряющий расчет каустик. Кроме этого в системе Corona реализованы двунаправленная трассировка лучей (BDPT) и двунаправленные прогрессивные фотонные карты (BDPM).

Hydra [9] – GPU рендер-система со смешенным и несмешенным решениями дебютировала также в 2012 году. Ключевыми алгоритмами являются кэш освещенности и стохастические прогрессивные фотонные карты (SPPM) [1] для расчета каустик.

Методика сравнения

Для того чтобы решить указанные во введении проблемы, применялась следующая методика:

1. Для сравнения была выбрана одна среда (3D Studio Max), что позволило добиться геометрического совпадения элементов сцены, включая положения источников света и камеры.



2. Для каждой системы и каждого сценария рассчитывался свой эталон, с которым впоследствии производилось сравнение. Это позволяет исключить различия реализации отдельных незначительных моментов и сосредоточиться на сравнении скорости интегрирования.

3. Для всех систем производилось сравнение двух типов. Сначала фиксировалась небольшая ошибка (насколько это возможно) и измерялось время синтеза изображения: так сравнивалось время синтеза качественного изображения. Затем фиксировалось время синтеза изображения (обычно небольшое, в пределах 1 минуты), и измерялась ошибка: так сравнивалось качество полученных изображений в условиях фиксированного времени. Из двух сравнений для систем со смешенным решением в результирующий график входил средний индекс производительности. Такой способ позволяет частично решить проблему оптимизации настроек для систем со смешенным решением, поскольку на итоговый результат влияют оба типа оптимизаций (ориентированные на качество и на скорость). Для систем с несмешенным решением соотношение скорость/качество для обоих типов сравнений совпадает.

Индекс производительности

Для того чтобы оценить производительность рендер-систем на различных сценах и сопоставить их друг с другом, введем абсолютный индекс производительности:

$$P_l = \frac{1}{MSE^2 \cdot t},$$

где MSE – квадратичная ошибка (Mean Square Error), вычисляемая при помощи программы «The compressorator», t – время в секундах. Если сцена, условия освещения и оборудование фиксированы, отношение индексов производительности для двух систем будет адекватно отражать отношение производительности этих систем. Однако зависимость сравнения от оборудования и абсолютные значения индекса снижают наглядность сравнения. По этой причине введем относительный индекс производительности:

$$P_{l(Rel)} = 100 \cdot \frac{P_l}{\max(P_l(VRay), P_l(Mental), \dots)}.$$

Относительный индекс производительности будет равен 100 баллам для системы, которая является на данной сцене самой быстрой. Остальные системы получат баллы пропорционально тому, насколько они медленнее. Таким образом, относительный индекс производительности не зависит от сложности сцены и его можно усреднить по всем тестовым сценам, оценив, насколько система проявила себя в комплексе.

Эксперименты

Все эксперименты производились на машине с CPU Core i7 3770 3.4 Ghz и GPU Nvidia GTX680. Память типа DDR3 – 16 Gb. В силу различия архитектуры CPU и GPU мы опирались на компромиссное решение, основанное на выборе оборудования одного ценового диапазона. Все ошибки были посчитаны при помощи программы «The Compressorator» [10].

Тестовые сценарии (рис. 1 цв. вклейки)

Сценарий номер 1 – «Cornell Box» с зеркальным чайником. Несмотря на свою простоту, в данном сценарии присутствуют практически все основные эффекты



трехмерной компьютерной графики: шумное первичное освещение и мягкие тени, зеркальные блики от источника освещения, отраженные каустики. Являясь геометрически простой, сцена в некоторой степени амортизирует стандартные потери производительности GPU трассировщиков лучей на ветвлениях, а CPU – трассировщиков лучей на кэш промахах.

Сценарий номер 2 – уличная (outdoor) сцена. Данная сцена, являясь геометрически сложной (из-за травы), тем не менее с точки зрения освещения достаточно проста – однородная панорама и один относительно неяркий источник освещения. Время синтеза изображения на такой сцене должно в основном быть обусловлено скоростью трассировки лучей.

Сценарий номер 3 – верхний коридор Crytek Sponza. В данном сценарии практически все видимое освещение вторичное. В данном сценарии силен вклад от второго и третьего диффузных переотражений, поэтому финальный сбор должен давать значительное ускорение. Данный сценарий наиболее точно отражает скорость расчета вторичного освещения. Сценарий нельзя назвать «сложным для расчета» (hard sampling), поскольку яркость солнца относительно невелика и солнцем освещена значительная часть поверхности сцены.

Сценарий номер 4 – зал конференций. Сложность расчета освещения в данной сцене заключается в большом числе источников освещения. Под потолком находится 20 источников прожекторного типа. Тем не менее каждый из источников светит на относительно небольшой участок сцены, поэтому, если в рендер-системе реализована эффективная схема сэмплирования источников, в каждой конкретной точке сцены большинство источников должны быть эффективно отброшены или учитываться относительно нечасто.

Сценарий номер 5 – освещение «небесными порталами». Данная сцена демонстрирует достаточно типичный сценарий расчета дневного освещения в помещении. При таком сценарии напротив окон ставятся источники света, имитирующие свет от внешнего окружения, проникающий через окно. Такой источник называется «небесным порталом» (Sky Portal). При правильной реализации «небесный портал» является полностью корректным решением. Такой источник света является средством расчета освещения от окружения при помощи явной стратегии (стратегии сэмплирования источников света). Иными словами, «небесный портал» – не самостоятельный источник света, а всего лишь подсказка для Монте-Карло-трассировки лучей, позволяющей вычислять освещение от окружения более эффективно в тех случаях, когда изнутри помещения видима относительно небольшая часть окружения. Однако при использовании небесных порталов расчет первичного освещения в определенной степени осложняется по 2 причинам. Во-первых, небесные порталы могут иметь значительные размеры, в результате чего замедляется расчет мягких теней. Во-вторых, число источников этого типа может быть достаточно большим (5–10), что еще более осложняет вычисление первичного освещения. На данной сцене были использованы различные комбинации методов для различных систем, показавшие себя наилучшим образом.

Сценарий номер 6 – тест на MLT (Metropolis Light Transport). В данном сценарии небольшой участок сцены освещается исключительно ярким направленным источником света, имитирующим солнце. Вторичное освещение, вызванное таким освещением, является трудным для расчета (hard sampling). Фотонные карты в сочетании с финальным сбором (как и карты светимости) амортизируют увеличение времени расчета только за счет ускорения вычисления компоненты от третьего и более переотражений. Однако вычисление компоненты от второго



переотражения света данным методом не ускоряется. С другой стороны, алгоритм переноса света Метрополиса (MLT) и аналогичные алгоритмы при условии корректной реализации их в той или иной системе должны давать на данной сцене значительное ускорение по сравнению с традиционным методом Монте-Карло и финальным сбором.

Сценарий номер 7 – водные каустики. В данной сцене присутствуют отраженные каустики и подводные каустики SDS типа (Specular Diffuse Specular), являющиеся сложными для расчета. IRay и VRayRT не были способны корректно рассчитать данный тип каутиков за приемлемое время, хотя система IRay способна эффективно считать каустики, видимые напрямую (ESDL).

Выходы

Анализируя графики на рис. 1 и 2 цв. вклейки, можно заключить, что несмещенные рендер-системы на GPU (IRay, VRayRT, Octane) обеспечивают в лучшем случае паритет с Mental Ray и VRay, а в худшем проигрывают последним в 1,5–2 раза. Выигрыш этих систем (IRay, VRayRT, Octane) на открытой сцене (сценарий 2) можно объяснить простой формой освещения, при которой время рендера зависит только от скорости трассировки лучей. С другой стороны, GPU и рендер-система на основе алгоритмов со смещенным решением Hydra показала значительный отрыв по скорости (в 4–5 раз) при вычислении вторичного освещения (сценарий 3) и каустиков (сценарий 7). На каустиках второе место занимает Corona с алгоритмом VCM. Несмотря на такое же соотношение скорости у VRay, в области вычисления каустиков мы отдадим ей третье место, поскольку в VRay сложнее добиться каустиков высокого качества, т. к. в этой системе фотонные карты не прогрессивные. Однако на вторичном освещении VRay прочно обосновалась на втором месте. Рендер-система Corona лучше всего показала себя при расчете освещения от «небесных порталов» (сценарий 6) и в условиях сложного диффузного освещения (сценарий 7). Неплохие результаты в среднем могут говорить о том, что классический подход вычисления освещения при помощи финального сбора и карт светимости и сейчас является весьма практичным решением.

Сравнивая скорость интегрирования каустиков в CPU рендерах VRay и Corona, мы приходим к выводу о том, что внимание, прикованное к алгоритму VCM в последние годы, возможно, завышено. Реализация этого алгоритма на практике в системе Corona дала выигрыш только на двух сценариях (1 и 7) и только за счет каустик. При этом каустики могут быть столь же эффективно вычислены при помощи значительно более простого в реализации алгоритма SPPM, а во всех остальных случаях VCM был значительно медленнее (до 10 раз), чем стандартный вариант Corona с попиксельным финальным сбором. Что касается MLT, ни Octane, ни IRay, предполагающие реализацию идей MLT, не показали ожидаемого для этого алгоритма увеличения производительности по сравнению со стандартной Монте-Карло трассировкой. Метод PMC в системе Octane позволил за приемлемое время рассчитать каустики в бассейне, однако, он приблизительно на 2 порядка проигрывает алгоритму SPPM, реализованному в системе Hydra.

Была достигнута высокая степень совпадения для всех рендер-систем (рис. 3 цв. вклейки). Полные данные доступны по адресу: http://ray-tracing.ru/upload/free/hydra/comparison_final.pdf.

Работа поддержанна грантами РФФИ № 12-01-00560, № 13-01-00454 и стипендией Президента РФ СП-4053.2013.5.

**К СТАТЬЕ В. А. ФРОЛОВА,
В. А. ГАЛАКТИОНОВА, М. А. ТРОФИМОВА
«СРАВНЕНИЕ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ СИСТЕМ РАСЧЕТА
ГЛОБАЛЬНОГО ОСВЕЩЕНИЯ
(ПО СОСТОЯНИЮ НА 2014 ГОД)»**

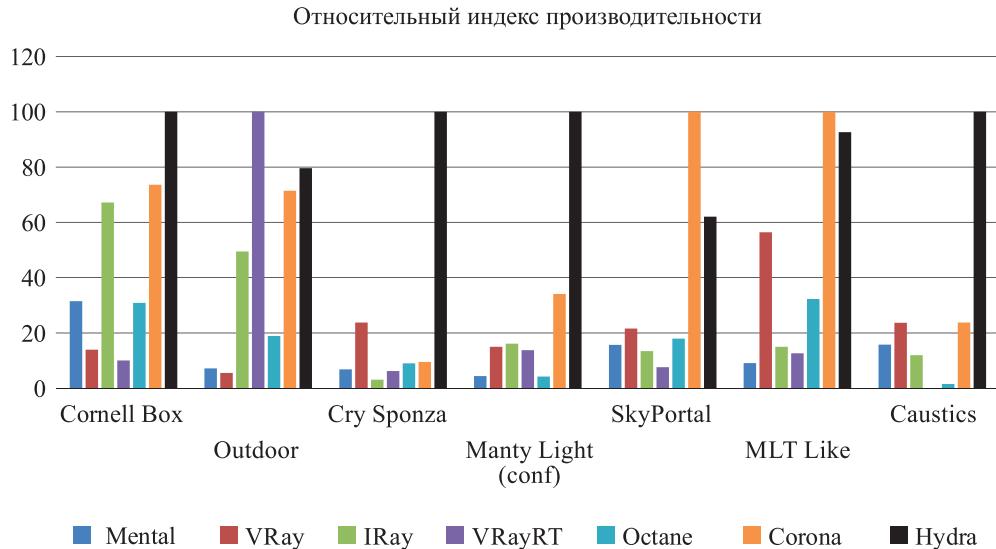


Рис. 1. Сравнение рендер-систем по относительному индексу производительности на различных сценах (см. http://ray-tracing.ru/upload/free/hydra/comparison_final.pdf)

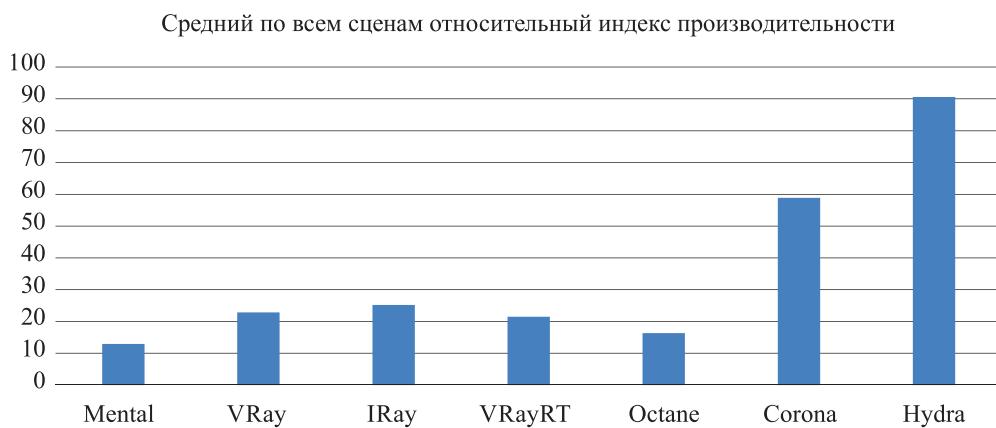


Рис. 2. Сравнение рендер-систем по относительному индексу производительности: среднее по всем сценам (см. http://ray-tracing.ru/upload/free/hydra/comparison_final.pdf)

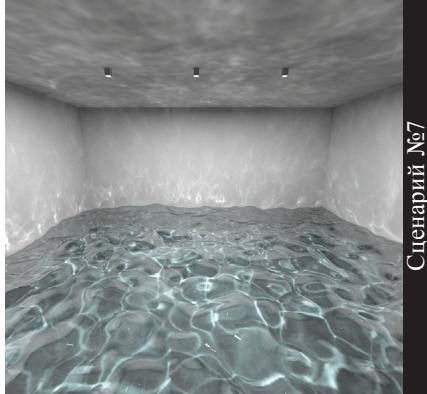


Рис. 3. Изображения сцен, на которых проводились сравнения



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hachisuka, T.n Stochastic progressive photon mapping / Toshiya Hachisuka, Henrik Wann Jensen // ACM Trans. Graph. – 2009. – V. 28. – P. 141:1–141:8.
2. Georgiev, I. Bidirectional light transport with vertex merging / Iliyan Georgiev, Jaroslav Krivanek, Philipp Slusallek // SIGGRAPH Asia 2011 Sketches. – 2011. – SA' 11. – P. 27:1–27:2.
3. NVIDIA. Mental ray [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.nvidia.ru/object/nvidia-mental-ray-ru.html>.
4. Chaos Group. Vray [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.chaosgroup.com/en/2/index.html>.
5. Nvidia. Nvidia iray faq [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.nvidia.ru/object/delta-tracing-3dmax-iray-ru.html>.
6. OTOY. Octane renderer [Electronic resource]. – Access mode : <http://render.otoy.com/>.
7. Photorealistic image rendering with population monte carlo energy redistribution, Eu-rographics Symposium on Rendering [Electronic resource] / Yu-Chi Lai, S. Fan, S. Chenney, C. Dyer. – Access mode : <http://kesen.realtimerendering.com/egsr2007Papers.htm>.
8. Corona render [Electronic resource] / O. Karlik, A. Hotovy, J. Krivanek, J. Konecny. – Access mode : <http://cg-school.org/corona-render-nevedannyj-fotorializm-bez-postobrabortki.html>.
9. Ray Tracing Systems. Hydra Renderer [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.slideshare.net/VladimirFrolov1/hydra-renderer-28570353>.
10. AMD. The compressorator [Electronic resource]. – Access mode : <http://developer.amd.com/tools-and-sdks/archive/legacy-cpu-gpu-tools/the-compressorator/>.

FROLOV Vladimir Aleksandrovich¹, junior researcher; GALAKTIONOV Vladimir Aleksandrovich¹, doctor of physical-mathematical sciences, professor, head of department; TROFIMOV Maksim Aleksandrovich², 3D artist

INDUSTRIAL GLOBAL ILLUMINATION BENCHMARK (ON 2014)

¹Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS

4, Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russia. Tel.: +7 (499) 250-79-95; e-mail: frolov@gin.keldysh.ru

² JSC «Novy Disk»

3, Polkovaya St., Moscow, 127018, Russia. Tel.: +7 (495) 785-65-13; e-mail: region@nd.ru

The article presents a comparative analysis of efficiency of modern commercial rendering systems. 7 most popular products for 3D Studio Max (Mental Ray, IRay, VRay3, VRayRT3, Corona, Octane, Hydra) in the rate of Global Illumination (GI) are compared. Based on the implemented research we conclude about the state of the art of rendering systems, the advantages and disadvantages of the CPU and GPU implementations, as well as the advantages and disadvantages of different algorithms. All render systems are ranked on points of relative performance for each scenario and in general. Our test scenes and the data are publicly available.

REFERENCES

1. Hachisuka T., Jensen H. W. Stochastic progressive photon mapping. ACM Trans. Graph., V. 28, № - 5, P. 141:1–141:8, dec 2009.
2. Georgiev I., Krivanek J., Slusallek P. Bidirectional light transport with vertex merging. SIGGRAPH Asia 2011 Sketches, New York, NY, USA, 2011, SA '11, P. 27:1–27:2, ACM.
3. NVIDIA, «Mental ray», 2014. [Electronic resource]. Access mode: <http://www.nvidia.ru/object/nvidia-mental-ray-ru.html>.
4. Chaos Group, «Vray», 2014. [Electronic resource]. Access mode: <http://www.chaosgroup.com/en/2/index.html>.
5. Nvidia, «Nvidia iray faq», 2014. [Electronic resource]. Access mode: <http://www.nvidia.ru/object/delta-tracing-3dmax-iray-ru.html>.
6. OTOY, «Octane renderer», 2014. [Electronic resource]. Access mode: <http://render.otoy.com/>.



7. Yu-Chi Lai, Fan S., Chenney S., Dyer C. Photorealistic image rendering with population monte carlo energy redistribution. Eurographics Symposium on Rendering [Electronic resource]. Access mode: <http://kesen.realtimerendering.com/egsr2007Papers.htm>.
8. Karlik O., Hotovy A., Krivanek J., Konecny J. Corona render [Electronic resource]. Access mode: <http://cg-school.org/corona-render-nevedannyj-fotorializm-bez-postobrabortki.html>.
9. Ray Tracing Systems. Hydra Renderer [Electronic resource]. Access mode: <http://www.slideshare.net/VladimirFrolov1/hydra-renderer-28570353>.
10. AMD. The compressorator [Electronic resource]. Access mode: <http://developer.amd.com/tools-and-sdks/archive/legacy-cpu-gpu-tools/the-compressorator/>.

© В. А. Фролов, В. А. Галактионов, М. А. Трофимов, 2014

Получено: 18.10.2014 г.

УДК 624:621.311

Н. Д. ЖИЛИНА¹, канд. пед. наук, проф. кафедры инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования; А. С. ПАВЛОВ², д-р техн. наук, проф. кафедры городского хозяйства и строительства; Р. Р. ТЕМИШЕВ², канд. экон. наук, проф. кафедры городского хозяйства и строительства

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗДАНИЯ РЕАКТОРА АЭС НА ПРЕДПРОЕКТНОЙ СТАДИИ

¹ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-47;
эл. почта: o_asp@nngasu.ru

²ФГБОУ ВПО «Высшая школа государственного управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации»
Россия, 109004, г. Москва, пер. Товарищеский, д. 19. Тел.: (495) 912-68-26;
эл. почта: ipkgos_gorhoz@mail.ru

Ключевые слова: жизненный цикл, геометрические характеристики, предпроектная стадия, оценка объема работ.

В представленной статье рассматривается предпроектный этап жизненного цикла строительного объекта, принцип построения универсальной экономико-математической модели, основанный на геометрических характеристиках объекта.

В настоящее время состав предпроектного этапа жизненного цикла строительного объекта не установлен нормативными документами. При обосновании инвестиций, выборе вариантов, технико-экономической оценке новых технологий последовательность и состав разработки устанавливаются заказчиком индивидуально. Часто инвестор хочет оценить стоимость объекта, не имея сколько-нибудь проработанных технических и конструктивных решений. Особенно остро эта проблема встает при планировании уникальных и технически сложных объектов, каким является, например, атомная электростанция. Несмотря на необходимость регламентирования разработки проектных решений, действующими документами состав предпроектной документации оговорен только в самом общем виде [1].

Для приближенной и оперативной (без разработки проектных спецификаций) оценки объема строительных материалов и конструкций (расхода бетона, арматуры, металла и т. п.) целесообразен метод, при котором задается минимум