

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
R o k 1 8 1 8.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»  
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-  
научного журнала «Месячник Полоцкий».*



---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия F. Строительство. Прикладные науки

В серии F научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области геодезии, геоэкологии и строительства.

---

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА  
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

У серыі F навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваанне і змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне геадэзіі, геаэкалогіі і будаўніцтва.

---

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY  
Series F. Civil engineering. Applied sciences

Series F includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in geodesy, geoecology and civil engineering.

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Адрес редакции:

Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь  
тел. + 375 (214) 59 95 44, e-mail: [vestnik@psu.by](mailto:vestnik@psu.by)

Отв. за выпуск: *Г.А. Шароглазова.*  
Редактор *С.Е.Рясова.*

Подписано к печати 30.10.2020. Бумага офсетная 70 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ризография.  
Усл. печ. л. 9,30. Уч.-изд. л. 11,21. Тираж 100 экз. Заказ 637.

## ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.2

### ПРОБЛЕМА ВЫСОТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В МИРОВОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

канд. техн. наук, доц. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА, д-р физ.-мат. наук, проф. В.Н. КОРОВКИН,  
Д.Н. НОВОКРЕЩЕНОВА  
(Полоцкий государственный университет)  
g.sharoglazova@psu.by, v.korovkin@pdu.by

*Статья посвящена проблеме высотного обеспечения, существующей в мировой геодезической практике, и современным направлениям ее решения. Органичная связь геодезии с гравиметрией обусловила двойное понятие высоты: физическое – приводящее к геопотенциальному числу, и геометрическое – как расстояние по вертикали между двумя точками пространства. Выбранный за начало счета высот уровень мирового океана не оправдал себя, так как в разных частях его поверхность из-за различных характеристик солёности, плотности, температуры воды и других факторов не является уровенной и отличается по высоте даже в пределах одного моря, поэтому в отдельных государствах установлены не только свои национальные начала счета высот, но и различные системы, строго говоря, не согласующиеся друг с другом и не отвечающие возможностям современной геодезии. Изложены реализуемые уже в настоящее время направления перехода к общеземной системе отсчета высот, базирующиеся на сочетании GPS/ГЛОНАСС технологий и гравиметрии, свободной от уровня морей и океанов, с которой будут надежно связаны национальные начала счета высот, включая и Республику Беларусь.*

**Ключевые слова:** нивелирование, гравиметрия, системы высот в геодезии, начало счета высот.

**Введение.** Геодезия как наука о координировании пространства с незапамятных времен занималась определением как минимум трех координат: широты, долготы, высоты. Но в силу того, что геодезические измерения выполняются в реальном гравитационном поле, а геодезические инструменты ориентируются по основным характеристикам этого поля (вертикальная ось – по направлению отвесной линии (силы тяжести), а горизонтальные оси и круги горизонтируются по уровенной поверхности), то результаты этих измерений не могут не зависеть от состояния гравитационного поля, что необходимо учитывать при координатных определениях. С целью нахождения всех необходимых координат геодезисты развивают плановые, высотные и гравиметрические сети, которые при их создании наземными методами по объективным причинам оказались разнесенными в пространстве, т.е. центры плановых геодезических сетей, нивелирных реперов и гравиметрических пунктов не совпали между собой. Это создавало большие сложности в математической обработке геодезических измерений, так как вызывало необходимость учета различных дополнительных поправок в результатах измерений, чтобы достичь необходимой точности определения координат.

Высотные сети, прежде всего, государственные, развиваемые очень трудоемким методом геометрического нивелирования, требуют единого начала счета высот, от которого будут отсчитываться превышения и отметки реперов. Наиболее естественным выбором представилась привязка начала счета высот к среднему уровню мирового океана и сообщаемых с ним морей, определяемому из многолетних морских уровнемерных наблюдений. На прежних этапах развития геодезии, высотного обеспечения планеты и масштабах распространения уровнемерных наблюдений это было оправданным, так как удовлетворяло запросам практики. Многие страны выбрали свои футштоки, обозначили на них средний многолетний уровень омывающего государство моря и приняли его за начало счета высот, полагая, что он совпадает со средним уровнем мирового океана. Не имеющие морей страны развили высотные сети от соседей. Так возникло несколько футштоков: Кронштадтский футшток в Балтийском море, в Финском заливе, средний уровень которого определен за период 1825–1839 гг. (Россия, Беларусь и большинство стран бывшего Советского Союза); Амстердамский футшток относительно среднего многолетнего уровня в Амстердамской части залива Эйсселмер (Европа и страны Прибалтики); Марсельский футшток, средний уровень Лионского залива по Марсельскому мареографу за 1885–1897 гг. (Франция); Анталийский футшток, средний уровень Средиземного моря в районе г. Анталия (Турция); 26 Американско-Канадских футштоков-мареографов (США и Канада); в Великобритании отсчет ведут от зафиксированного между 1915 и 1921 гг. среднего уровня моря у города Ньюлин в проливе Ла-Манш и т.д.

Однако процесс развития высотных сетей осложнился по ряду причин:

– уровни морей и океанов из-за различия температуры и солёности воды в разных частях существенно отличаются между собой. Так, в Австралии по данным водного и геометрического нивелирования

установлено, что уровень моря на северо-востоке на 1,75 м ниже, чем в остальных частях побережья; средний уровень Российских морей ниже среднего уровня в Кронштадте от 0,17 м (Азовское море) до 0,78 м (Чукотское море) [1], а размах колебаний средних уровней морей (СУМ) в Европе относительно СУМ в Амстердаме составляет 0,615 м (от 0,278 м в порту Кеми (Финляндия) до –0,337 м в Триесте [2];

– поверхность мирового океана не является уровенной и не совпадает с геоидом, о чем будет сказано несколько ниже;

– национальные высотные начала отсчета не связаны между собой, а высотные сети развиваются в разных системах высот.

Нельзя не признать, что сформулированные проблемы не соответствуют современным возможностям геодезии, требуют повсеместного решения и уже активно решаются в Европе, России, США. В Беларуси также созданы предпосылки для реализации современной высотной основы на новых принципах, сформулированных в работах [3–5].

**Системы высот в геодезии и начала счета высот, существующие в различных государствах.** Известно, что отвечающие за координатное обеспечение окружающего нас пространства геодезисты применяют достаточно большое число систем координат и систем отсчета. Это касается не только государственных или местных систем отсчета, но и общеземных, что вызвано объективными причинами, касающимися, прежде всего, движения земных полюсов внутри Земли, неоднородности гравитационного поля, его вариаций во времени, геодинамических явлений и т.д.

В силу того, что геодезист работает в реальном поле силы тяжести, то теоретически он мог бы избежать необходимости введения большого числа систем координат и работать в одной натуральной системе, так как силовые линии поля силы тяжести и уровенные поверхности создают естественную опору для определения единственного положения любой точки в пространстве как пересечения в ней силовой линии и уровенной поверхности [6]. Однако на практике эту систему координат применить трудно в силу слабой изученности гравитационного поля Земли.

К натуральной системе координат ближе всего подходит астрономическая система, в которой в точности совпадают плановые координаты (астрономическая широта  $\varphi$  и астрономическая долгота  $\lambda$ ), а отличается только третья координата, связанная с высотой. В астрономической системе координат – это ортометрическая высота  $H^{\text{орт}}$ , определяемая как расстояние от геоида до точки земной поверхности, отсчитанное по отвесной линии. В натуральной же системе координат применяется физическое понятие высоты как разности потенциалов силы тяжести между исходной уровенной поверхностью (поверхностью геоида, проходящей через начало счета высот) и уровенной поверхностью нивелирного репера точки  $M$  местности, то есть  $W_0 - W_M$ , известное как геопотенциальное число  $C_M$ , определяемое по формуле

$$C_M = W_0 - W_M = \int_0^M g dh, \quad (1)$$

где  $0$  – начало счета высот;

$M$  – точка земной поверхности;

$dh$  – элементарное превышение на каждой нивелирной станции;

$g$  – текущее ускорение силы тяжести по нивелирной линии.

Таким образом, натуральная система координат требует знания значения ускорения силы тяжести в каждой точке стояния геодезического прибора, что выполнить невозможно. Поэтому на практике вводят различные геодезические системы координат, отнесенные к эллипсоиду или плоскости, а для высотного обеспечения – к уровенной поверхности геоида, которая в силу неопределимости заменяется квазигеоидом, приводящим уже к системе нормальных высот, разработанной Молоденским.

Вообще говоря, на практике геодезист в основном имеет дело с тремя высотами: геодезической  $H^M$  (расстояние от точки  $M$  местности до эллипсоида, отсчитанное по нормали к эллипсоиду); ортометрической  $H^{\text{орт}}$  (расстояние от геоида, проходящего через начало счета высот, до точки земной поверхности, отсчитанное по отвесной линии этой точки); нормальной  $H_M^{\gamma}$  (расстояние от точки земной поверхности до поверхности квазигеоида, отсчитанное по направлению нормальной силы тяжести, с высокой степенью приближения совпадающей с нормалью к эллипсоиду). Геодезическое сообщество России [4–12] выступает за использование на практике системы нормальных высот, теоретически обоснованное М.С. Молоденским, как не зависящей от пути нивелирования и позволяющей вычислить поправки для перехода к ней только по результатам измерений на поверхности Земли, то есть не требующей знания о внутренних распределениях масс. Такой подход признается все большим числом стран.

Однако в реальности большинство государств мира пока используют не только разные начала отсчета высот, но и разные системы высот. Так, Россия, Беларусь и другие страны СНГ, а также такие европейские страны, как Швеция, Германия, Франция, применяют систему нормальных высот. Некоторые европейские государства, Турция и страны Американского континента используют ортометрические высоты

по Гельмерту. В Австрии, странах распавшейся Югославии, Норвегии приняты нормально-ортометрические высоты. Это не имеет значения, когда высоты определены с невысокой точностью, и тогда их, за исключением геодезической, называют высотами над уровнем моря, или абсолютными высотами, а разность высот – превышением или относительными высотами, что аналогично названию координат, которые приближенно называют географическими, не разделяя на геодезические и астрономические, но при точных и высокоточных работах с данным обстоятельством считаться необходимо.

С геоидом тоже не все ясно, и как говорилось выше, его вынужденно заменяют квазигеоидом. Известно два определения геоида:

1) геоид – это физическая модель Земли, поверхность которой совпадает с невозмущенной поверхностью морей и океанов, а под материками продолженная перпендикулярно к направлениям силы тяжести (отвесным линиям), проведенным через каждую точку земной поверхности;

2) геоид – это физическая модель Земли, ограниченная уровенной поверхностью поля силы тяжести, проходящей через начало счета высот.

Уровенная поверхность – это поверхность одинакового потенциала и, следовательно, одинаковой высоты. Океанографическое нивелирование и спутниковая альтиметрия показали, что отличия поверхности мирового океана от уровенной достигают 2 метров, то есть при современной точности геодезических измерений поверхность мирового океана нельзя рассматривать как уровенную поверхность потенциала силы тяжести. Поэтому первое определение геоида можно принимать как некоторое приближенное представление о нем. Безусловно, поверхность геоида должна быть уровенной. Но уровенную поверхность можно теоретически провести через любую точку нашей планеты. Если бы начало счета высот на Земле было единственным, то и геоид существовал бы в единственном числе согласно второму, более строгому, его определению. Но, как видим, пока нет общеземного начала счета высот. Следовательно, геоидов может быть несколько и даже сколь угодно много.

В целом же это вносит в высотное обеспечение нашей планеты большую путаницу, несовместимую с современными геодезическими возможностями и научно-практическими потребностями, связанными, например, с необходимостью работы с геоинформационными базами данных, выходящими за национальный уровень. Но и в масштабах отдельного государства при наличии спутниковых средств измерений, развитии гравиметрических приборов создавать высотную основу страны опираясь на морские уровенные наблюдения и некоторую горизонтальную полосу на рейке футштока представляется устаревшим подходом.

**Выбор оптимальной системы высот.** Основные требования к системе высот, в которой должны быть представлены результаты нивелирования для широкого спектра научно-практических задач, сформулированы Л.П. Пеллиным [3, с. 57]:

- 1) высоты пунктов должны быть однозначны независимо от трассы нивелирования;
- 2) высоты должны определяться лишь по данным измерений на поверхности Земли без привлечения каких-либо гипотетических данных о ее внутреннем строении;
- 3) поправки в измеренные превышения за переход к принятой системе высот должны быть достаточно малы, чтобы ими можно было пренебречь при обработке нивелировок низших классов;
- 4) принятой системе высот должен соответствовать достаточно строгий и удобный способ определения геоидальной части геодезической высоты  $H$ ;
- 5) высоты должны быть по возможности постоянными для точек на одной уровенной поверхности.

В этой же работе отмечается, что требования 3 и 5 противоречат друг другу. Имеющиеся противоречия снимаются в работах [7–10].

Рассмотрим, как выполняются сформулированные требования к используемым системам высот. Наиболее заманчиво вообще не считаться с неоднородностью гравитационного поля и пользоваться при определении отметок *измеренными нивелирными превышениями*. Для этого случая в работе [3] дана удобная приближенная формула оценки влияния неоднородности гравитационного поля на результаты нивелирования и рассчитанные по ней числовые характеристики этих влияний:

$$\delta H \approx -0,0053H \sin(2B_{cp})\Delta B, \quad (2)$$

где  $\delta H$  – влияние непараллельности уровенных поверхностей гравитационного поля Земли на превышение по трассе нивелирования;

$H$  – отметка (высота) точки земной поверхности;

$B_{cp}$  – средняя геодезическая широта нивелирной трассы;

$\Delta B$  – разности геодезических широт конечного и начального реперов трассы.

Из (2) следует, что при высоте порядка 2 км, широте  $B_{cp} = 45^\circ$  и расстоянию по меридиану 50 км ( $\Delta B = 0,57^\circ = 0,01$  радиан) это влияние на нивелирование составит около 10 см, что необходимо учитывать в точном нивелировании. В протяженных трассах с конечными нивелирными реперами, отличающимися по широте на  $30^\circ$ , влияние непараллельности уровенных поверхностей на измеренные превышения

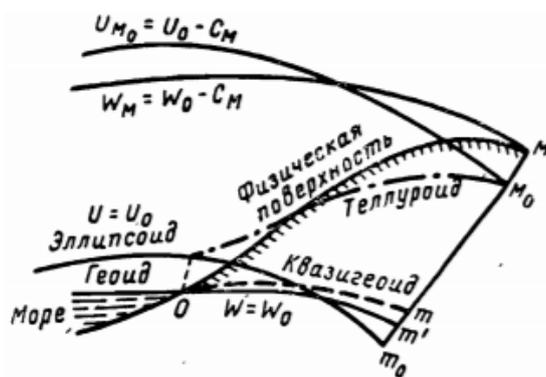
составит уже несколько метров. Ясно, что такую поправку следует учитывать при любой точности нивелирования. Отметим, что согласно (2) непараллельность уровенных поверхностей максимально влияет на нивелирные линии меридионального направления.

Следовательно, измеренными высотами, то есть вычисленными по нивелирным превышениям без учета непараллельности уровенных поверхностей, из-за их неопределенности нельзя пользоваться на практике, и они не удовлетворяют условию (1), так как зависят от пути нивелирования.

Ортометрическая высота  $H^{\text{орт}}$ , определяемая как расстояние от геоида до точки земной поверхности (рисунок), отсчитанное по силовой линии поля силы тяжести, выражается формулой

$$H^{\text{орт}} = \frac{\int_{OM} g dh}{g_{mM}} = \frac{C_M}{g_{mM}} = \frac{W_0 - W_M}{g_{mM}}, \quad (3)$$

где  $g_{mM}$  – среднее интегральное значение силы тяжести вдоль силовой линии, проходящей через точку  $M$  до поверхности геоида; остальные обозначения даны в формуле (1) и ясны из рисунка.



**Геоид** – уровенная поверхность поля действительной силы тяжести, проходящая через начало счета высот ( $W = W_0$ ); **эллипсоид** – уровенная поверхность поля нормальной силы тяжести ( $U = U_0$ );  $W_M$  – действительный потенциал силы тяжести уровенной поверхности точки  $M$  местности; **квазигеоид** (почти геоид, отличие  $m'm$  на рисунке) – введенная М.С. Молоденским модель Земли, поверхность которой расположена от земной поверхности на расстоянии нормальных высот ( $H^Y = mM$ ) или на расстоянии аномалии высоты  $\zeta = m_0m$  от эллипсоида; **теллуroid** – поверхность Земли 1-го приближения, введенная М.С. Молоденским, находится на расстоянии аномалии высоты  $\bar{\zeta} = M_0M$  от земной поверхности, а также может быть получена путем отложения нормальных высот точек земной поверхности от эллипсоида;  $C_M$  – геопотенциальное число, определяемое формулой (1)

Рисунок. – Основные поверхности Земли и соответствующие им потенциалы силы тяжести

Как следует из формулы (3), строгое определение ортометрической высоты требует измерения силы тяжести внутри Земли в промежутке земная поверхность-геоид, что не согласуется с условием 2 для выбора системы высот. Следовательно, ортометрической системой высот также пользоваться нежелательно. Параллельно отметим, что для перехода от ортометрической высоты к геодезической необходимо учесть расстояние от геоида до эллипсоида, которое еще называют высотами геоида (4).

$$\bar{H} = H^{\text{орт}} + \zeta, \quad (4)$$

где  $\bar{H}$  – геодезическая высота;  
 $\zeta$  – высота геоида над эллипсоидом.

Определяемое формулой (1) геопотенциальное число, являющееся по сути физической характеристикой высоты, не зависит от пути нивелирования. Но на практике им пользоваться неудобно, так как трудно представить, что строитель будет выражать высоту потолка над полом не как расстояние, а как работу, которую необходимо проделать для перемещения единичной массы от пола к потолку.

**Нормальная высота.** Сформулированным выше условиям 1–4 к выбору системы высот максимально удовлетворяет нормальная высота  $H_M^Y$ , определяемая по формуле

$$H_M^Y = \frac{\int_{OM} g dh}{\gamma_{mM}} = \frac{C_M}{\gamma_{mM}} = \frac{W_0 - W_M}{\gamma_{mM}} \quad (5)$$

На рисунке нормальная высота точки  $M$  представлена отрезком  $mM = m_0M_0$ .

Геодезическая высота  $\overline{H}_M$  связана с нормальной высотой  $H_M^Y$  формулой

$$\overline{H}_M = H_M^Y + \overline{\zeta}_M, \quad (6)$$

где  $\overline{\zeta}_M$  – высота квазигеоида над эллипсоидом (аномалия высоты).

Нормальная высота отсчитывается по силовой линии нормального поля ( $Mm_0$  на рисунке). Через потенциалы силы тяжести аномалия высоты  $\overline{\zeta}_M$  определяется формулой

$$\overline{\zeta}_M = \frac{U_{M_0} - U_M}{\gamma_{M_0}}, \quad (7)$$

где  $U_{M_0}$ ,  $U_M$  – нормальные потенциалы силы тяжести в точках  $M_0$  и  $M$  соответственно;

$\gamma_{M_0}$  – нормальная сила тяжести в точке  $M_0$ .

$$\overline{\zeta}_M = \frac{T_M}{\gamma_{M_0}} - \frac{W_0 - U_0}{\gamma_{M_0}}, \quad (8)$$

где  $T_M = (W_M - U_M)$  – возмущающий (аномальный) потенциал, однозначно определяемый по измерениям силы тяжести на поверхности Земли по М.С. Молоденскому.

Нормальные высоты практически удовлетворяют всем требованиям к выбору системы высот и признаются оптимальными.

Современный принцип установления начала отсчета высот также видоизменился, так как при его выборе отошли от использования в качестве исходных многолетних уровнемерных наблюдений на морских постах по причинам, изложенным выше. Он базируется на нормальной системе высот, развит с учетом современных возможностей спутниковых технологий и инструментальной гравиметрии в работах [4; 5; 12] и максимально свободен от противоречий традиционного подхода.

**Современный подход к организации геодезического высотного обеспечения.** Современный подход к организации геодезического высотного обеспечения наиболее полно изложен в работе [4]. Он ориентирован на использование системы нормальных высот, согласуется с теорией М.С. Молоденского и устраняет противоречия при существующих принципах установления системы отсчета высот относительно среднего многолетнего уровня моря, отличающегося на разных уровнемерных постах на метр и более, путем отказа от использования уровнемерных наблюдений в качестве исходных и заменой их пунктами геодезических сетей высшего уровня, координирование которых с наивысшей точностью выполнено на основе современных методов GPS/ГЛОНАСС измерений, дополненных высокоточной гравиметрией и связанных с высокоточной сетью геометрического нивелирования.

Если речь идет об общеземной системе отсчета высот, то это пункты IGS сети и других глобальных космических построений, а также пункты ФАГС и ВГС государственных геодезических сетей. Создание общеземной системы отсчета высот требует тесного международного сотрудничества многих стран. Для достижения этой цели одновременно ведется работа в двух направлениях – региональном и общеземном:

- 1) создание национальной или региональной Главной высотной основы (ГВО);
- 2) создание единой общеземной ГВО.

В виду важности проблемы создания ГВО в мире и отдельных странах на современной ступени развития геодезии и гравиметрии приведем выдержку из работы Демьянова Г.В. [4], автора и активного участника практической реализации этого подхода. «Основная идея новых принципов установления единой общемировой системы нормальных высот состоит в том, что единую систему отсчета высот определяет поверхность общего земного эллипсоида и потенциал  $U_0$  на поверхности этого эллипсоида, принимаемый за нормальный. Понятие геоида в этом случае формулируется как эквипотенциальная поверхность с потенциалом  $W_0$ , равным нормальному  $U_0$  на поверхности общеземного эллипсоида. В этом случае не постулируется равенство нулю нормальной высоты в уровнемерных постах, принятых в качестве исходных. При этом подходе исходные нивелирные пункты вообще в принципе отсутствуют, как отсутствует исходный пункт в общемировой геоцентрической системе координат. Систему нормальных высот определяет вся совокупность геодезических пунктов, в каждом из которых с высокой точностью по спутниковым данным определена геодезическая (эллипсоидальная) высота  $H$  и высота квазигеоида по гравиметрическим данным. На территории России такой совокупностью пунктов могут служить пункты ФАГС и ВГС. Для всей поверхности Земли – сеть пунктов постоянных спутниковых наблюдений, для целей геодинамики (IGS).

Нормальная высота в этом случае будет равна нулю в той точке земной поверхности, в которой реальный потенциал  $W_i$  равен нормальному  $U_0$  на поверхности общего земного эллипсоида, который мы принимаем за нормальный.

В основу разрабатываемых новых принципов развития системы нормальных высот должна быть заложена необходимость соблюдения двух основных условий.

Первое условие – создание оптимальных условий для применения в системе высотного обеспечения современных высокоэффективных спутниковых методов GPS/ ГЛОНАСС измерений.

Второе условие – сохранение и реализация уже созданного научного и экономического потенциала традиционных методов геометрического нивелирования.

В новой разработанной системе высотного обеспечения ни в коей мере не уменьшается роль существующей главной высотной основы страны (ГВО), то есть высокоточного геометрического нивелирования I и II классов.

Во-первых, при установлении новой системы нормальных высот данные высокоточного нивелирования являются необходимой составной частью всего комплекса данных на пунктах ФАГС и ВГС наравне с геодезическими высотами и высотами квазигеоида. Именно для этих целей в состав каждого пункта ФАГС и ВГС входят два пункта ГВО, на которых выполнены высокоточные спутниковые определения геодезических высот.

Во-вторых, существующие нивелирные сети, как и прежде, будут являться средством распространения системы нормальных высот на территории страны, но уже не от одного исходного пункта (уровнемерного поста), а относительно всей совокупности пунктов ФАГС и ВГС.

Такой принцип установления системы нормальных высот оптимальным образом соответствует всей общей системе геодезического обеспечения, основанной на современных спутниковых технологиях. В результате мы будем иметь внутренне согласованную систему геодезического обеспечения по всем трем координатам, координатную основу, которе. будет реализовывать одна и та же совокупность пунктов ФАГС и ВГС».

Данный подход создания ГВО, когда исходной системой отсчета высот служит не средний уровень моря (уровнемерные пункты переводятся в разряд рядовых реперов нивелирной сети), а нивелирная сеть страны опирается не на один футштока, а на совокупность пунктов ФАГС и ВГС, на которых выполнены не только высокоточные спутниковые наблюдения, но и гравиметрические измерения, а также определены высоты из высокоточного геометрического нивелирования, реализуется в России [12], Вьетнаме [13] и других государствах.

В России, например, согласно новому принципу система отсчета высот задается 64 пунктами ФАГС и в перспективе 343 пунктами ВГС, на которых выполнены высокоточные спутниковые измерения, абсолютные гравиметрические измерения и высокоточное геометрическое нивелирование, что позволяет с высокой точностью определить аномалию высоты, геодезическую высоту и нормальную высоту. Найденные на этих пунктах по формуле (9) нормальные высоты как раз и будут являться исходной системой отсчета высот:

$$H_i^y = \bar{H}_i + \bar{\zeta}_i. \quad (9)$$

Значок  $i$  в формуле (9) подчеркивает, что исходная основа страны задается не относительно одного пункта (0 Кронштадтского футштока), а относительно совокупности пунктов спутниковой геодезической сети высшего разряда, обеспеченной гравиметрией и высокоточным геометрическим нивелированием.

Ввиду того, что в качестве государственной системы высот в России служит Балтийская нормальная система высот 1977 года, отнесенная к 0 Кронштадтского футштока, на данном этапе реализации нового принципа перехода к общеземной системе отсчета высот, очевидно, используется региональный геоид, проходящий через 0 Кронштадтского футштока, от которого в дальнейшем будет осуществлен переход к общеземной системе отсчета высот.

По такому же принципу выполняется построение ГВО Вьетнама, Азербайджана, а после создания современной гравиметрической сети будет реализовано и в Беларуси.

**Заключение.** Существующие проблемы высотного обеспечения нашей планеты, вызванные большими отклонениями морской поверхности от уровня, не могут быть решены при традиционном подходе развития нивелирных сетей от морских футштоков. Однако современные спутниковые технологии развития высокоточных геодезических сетей, а также уровень инструментальных возможностей гравиметрии позволяют отказаться от использования при нивелировании в качестве исходных морских уровнемерных пунктов, перевести их в разряд рядовых реперов, и высотное обеспечение развивать от пунктов геодезических спутниковых построений высшего звена (IGS, ФАГС, ВГС), на которых с высокой точностью определены геодезические высоты, аномалии высот и, соответственно, нормальные высоты. Именно нормальные высоты, найденные на этих пунктах с высокой точностью из GPS/ГЛОНАСС измерений,

высокоточных гравиметрических наблюдений будут задавать высотную систему отсчета при развитии нивелирных сетей. Этот подход, ориентированный на использование системы нормальных высот, согласующийся с теорией М.С. Молоденского и устраняющий противоречия при традиционных принципах установления системы отсчета высот относительно среднего многолетнего уровня моря, отличающегося на разных уровнях на метр и более, разработан российским геодезистом Г.В. Демьяновым и успешно реализуется на практике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов, Л.А. От чего ведется отсчет высот / Л.А. Борисов // Человек и стихия. – Л. : Гидрометеоздат, 1975. – С. 183–187.
2. Лакомб, А. Физическая океанография / А. Лакомб. – М. : Мир, 1974. – 498 с.
3. Пеллинен, Л.П. Высшая геодезия (теоретическая геодезия) / Л.П. Пеллинен. – М. : Недра, 1978. – 264 с.
4. Демьянов, Г.В. Разработка принципов развития системы нормальных высот на основе современных спутниковых технологий : дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.32 / Г.В. Демьянов ; МИИГАиК. – М., 2004. – 148 л.
5. Демьянов, Г.В. Об установлении единой общеземной системы нормальных высот / Г.В. Демьянов, А.В. Майоров. // Гравиметрия и геодезия / Б.В. Бровар [и др.] ; под ред. Б.В. Бровара. – М. : Научный мир, 2010. – С. 301–305.
6. Высшая геодезия. Часть III. Теоретическая геодезия : учеб. для вузов / Огородова, Л.В. – М. : Геодезкартгиздат, 2006. – 384 с.
7. Еремеев, В.Ф. Теория высот в гравитационном поле Земли / В.Ф. Еремеев, М.С. Юркина. – М. : Недра, 1971. – 144 с.
8. Молоденский, М.С. Основные вопросы геодезической гравиметрии / М.С. Молоденский // Труды ЦНИИГАиК. – М., 1945. – Вып. 42. – 106 с.
9. Еремеев, В.Ф. Теория динамических, ортометрических и нормальных высот / В.Ф. Еремеев // Труды ЦНИИГАиК. – М., 1951. – Вып. 86. – С. 11–51.
10. Молоденский, М.С. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли / М.С. Молоденский, В.Ф. Еремеев, М.И. Юркина // Труды ЦНИИГАиК. – М., 1960. – Вып. 131. – 251 с.
11. Бровар, Б.В. О развитии гравиметрических работ в интересах геодезии / Б.В. Бровар, Н.А. Гусев, М.И. Юркина // Гравиметрия и геодезия / Б.В. Бровар [и др.] ; под ред. Б.В. Бровара. – М. : Научный мир, 2010. – С. 461–468.
12. Побединский, Г.Г. Современное состояние государственной системы геодезического обеспечения Российской Федерации и основные направления ее развития / Г.Г. Побединский, И.А. Столяров // Геодезия, картография и навигация – современные подходы к формированию и использованию геопространственных данных: междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19–20 апр. 2017 г. / Гос. ком. по имуществу Респ. Беларусь. – 2017. – С. 14–27.
13. Ха Минь Хоа. Развитие государственной высотной системы Вьетнама на основе использования локальной системы геоида / Ха Минь Хоа // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 2. – С. 10–13.

Поступила 07.09.2020

#### THE PROBLEM OF HIGH-ALTITUDE SUPPORT IN WORLD GEODETIC PRACTICE

**G. SHAROGLAZOVA, V. KOROVKIN, D. NOVOKRESHCHENOVA**

*The article is devoted to the problem of high-altitude support existing in the world geodetic practice, and modern directions for its solution. The organic connection between geodesy and gravimetry has led to a double concept of height: physical – leading to a geopotential number, and geometric – as the vertical distance between two points in space. The world ocean level chosen at the beginning of the altitude calculation did not justify itself, because in different parts of its surface, due to various characteristics of salinity, density, water temperature and other factors, it is not level and differs in height even within the same sea. Therefore, individual states have established not only their own national origins for counting heights, but also various systems, strictly speaking, not consistent with each other and not meeting the capabilities of modern geodesy. The directions of the transition to a common terrestrial reference system of heights, based on a combination of GPS / GLONASS technologies and gravimetry, free from the level of seas and oceans, with which the national origins of heights counting, including Belarus, will be reliably connected.*

**Keywords:** leveling, gravimetry, systems of heights in geodesy, the beginning of counting heights.

УДК 528.63

## АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМ КООРДИНАТ НА ОСНОВЕ РАЗНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ДАННЫХ

канд. техн. наук, доц. А.М. ДЕГТЯРЕВ, А.С. ИВАШНЁВА  
(Полоцкий государственный университет)

В геодезии часто возникает необходимость замены одной координатной системы на другую. На сегодняшний день в связи с ростом количества и качества информации и необходимостью интегрирования данных из разнородных источников использование данной процедуры актуализируется. Для преобразования координат из одной системы в другую разработано большое количество методов, основанных на различных способах представления данных и алгоритмах решения. В данной статье рассмотрены несколько подходов решения задачи трансформирования систем координат на основе разных представлений данных. Предлагается для получения коэффициентов преобразования использовать формулы, основанные на координатах и на разностях координат общих точек. Представлены алгоритмы решения по предложенным подходам и проведен анализ полученных результатов вычислений.

**Ключевые слова:** трансформирование, система координат, аффинная модель, элементы преобразования, метод наименьших квадратов.

**Введение.** В геодезии задача преобразования координат на плоскости возникает, когда часть сети вставляется в сеть с другой системой координат; когда определяются элементы деформации различных объектов; при выносе в натуру проектов сооружений; когда главные оси объектов включаются в государственную систему; при выполнении фотограмметрических работ; в географических информационных системах и т.д. Несмотря на широту использования и кажущуюся понятность процесса двумерного трансформирования, есть ряд важных вопросов, которые на сегодняшний день требуют дополнительного исследования.

**Основная часть.** Хорошо известно, что каковы бы ни были две произвольные декартовы прямоугольные системы координат на плоскости, координаты любой точки этой плоскости относительно первой системы являются линейными функциями координат этой же точки относительно второй системы. Формулы плоского аффинного преобразования для одной точки имеют вид [1]

$$\begin{aligned} X_n &= f_1(X_c, Y_c) = aX_c + bY_c + c \\ Y_n &= f_2(X_c, Y_c) = dX_c + eY_c + f \end{aligned} \quad (1)$$

где  $X_n, Y_n$  – координаты в новой системе;  
 $X_c, Y_c$  – координаты старой систем;  
 $a, b, c, d, e, f$  – коэффициенты линейного преобразования на плоскости.

На основе формул (1), имея точки, координаты которых известны в обеих системах координат, можно определить преобразующие коэффициенты и затем трансформировать точки, координаты которых существуют только в одной системе координат. Очевидно, что для однозначного определения параметров преобразования между двумя отдельными системами координат достаточно иметь количество уравнений, равное количеству неизвестных параметров, однако для контроля и оценки точности берется избыточное число точек, что приводит к переопределенной системе (1).

Для получения преобразующих коэффициентов переопределенную систему (1) можно решить различными способами на основе метода наименьших квадратов. Один из них – хорошо известный «метод растягивания» [2], при котором систему (1) записывают в эквивалентном, но более удобном для этого метода представлении:

$$\begin{bmatrix} (X_n)_1 \\ (Y_n)_1 \\ (X_n)_2 \\ (Y_n)_2 \\ \dots \\ (X_n)_n \\ (Y_n)_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (X_c)_1 & (Y_c)_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (X_c)_1 & (Y_c)_1 & 0 & 1 \\ (X_c)_2 & (Y_c)_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (X_c)_2 & (Y_c)_2 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (X_c)_n & (Y_c)_n & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (X_c)_n & (Y_c)_n & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix}, \quad (2)$$

или в свернутом виде

$$\begin{bmatrix} (K_n)_1 \\ (K_n)_2 \\ \dots \\ (K_n)_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix}; K_n = A \cdot \hat{k}, \quad (3)$$

где  $A_i$  – матрица плана для одной точки;

$\hat{k}$  – вектор коэффициентов.

Для получения решения запишем уравнение поправок для переопределенной системы (2)

$$v = A \cdot \hat{k} - K_n. \quad (4)$$

На основе условия метода наименьших квадратов  $v^T v = \min$  переходим к совместной системе нормальных уравнений

$$\begin{aligned} A^T A \cdot \hat{k} &= A^T \cdot K_n, \\ N \cdot \hat{k} &= f \end{aligned} \quad (5)$$

где  $N$  – матрица коэффициентов нормальных уравнений;

$f$  – вектор свободных членов системы нормальных уравнений.

Решение системы (4) методом обращения дает

$$\hat{k} = Q \cdot f, \quad (6)$$

где  $Q = N^{-1}$ .

Имея вектор коэффициентов преобразования, можно рассчитать при необходимости элементы аффинного преобразования по следующим формулам:

$$\begin{cases} m_x = \sqrt{a^2 + d^2} \\ m_y = \sqrt{b^2 + e^2} \\ \varphi = \arctg\left(\frac{d}{a}\right) \\ (\varphi + \varepsilon) = \arctg\left(\frac{-b}{e}\right), \end{cases} \quad (7)$$

где  $m_x, m_y$  – масштабные коэффициенты по осям  $X, Y$  соответственно;

$\varphi$  – угол поворота системы координат;

$\varepsilon$  – величина неортогональности.

В геодезической практике параметры преобразования координат также определяют с помощью другого подхода: через разности исходных координат [1; 3]:

$$\begin{aligned} \Delta x' &= a_1 \Delta x + b_1 \Delta y \\ \Delta y' &= a_2 \Delta x + b_2 \Delta y \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\Delta x' = x'_{i+j} - x'_i$ ,  $\Delta y' = y'_{i+j} - y'_i$  – разности координат в новой системе координат;

$\Delta x = x_{i+j} - x_i$ ,  $\Delta y = y_{i+j} - y_i$  – разности координат в старой системе координат;

$i = 1, 2, K, n-1$ ;

$j = i+1, i+2, K, n$ ;

$n$  – количество точек с известными координатами в двух системах.

При этом способе представления данных максимальное число уравнений определяют как число комбинаций  $C_n^k$ , при этом расположение элементов внутри группы безразлично [4]:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}, \quad (9)$$

где  $n$  – количество всех элементов;

$k$  – количество элементов в каждой группе.

Так как система уравнений (7) избыточная, решение производится методом наименьших квадратов, уравнения поправок будут иметь вид

$$v = A\delta - l, \quad (10)$$

где  $A = \begin{bmatrix} \Delta x_{2-1} & \Delta x_{3-1} & \Delta x_{4-1} & \Delta x_{5-1} & K & \Delta x_{(i+J)-i} \\ \Delta y_{2-1} & \Delta y_{3-1} & \Delta y_{4-1} & \Delta y_{5-1} & K & \Delta y_{(i+J)-i} \end{bmatrix}^T$  – матрица коэффициентов при неизвестных [3];

$\delta = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{bmatrix}$  – матрица неизвестных параметров;

$l = \begin{bmatrix} \Delta x'_{2-1} & \Delta x'_{3-1} & \Delta x'_{4-1} & \Delta x'_{5-1} & K & \Delta x'_{(i+J)-i} \\ \Delta y'_{2-1} & \Delta y'_{3-1} & \Delta y'_{4-1} & \Delta y'_{5-1} & K & \Delta y'_{(i+J)-i} \end{bmatrix}^T$  – матрица свободных членов.

Параметры получают из решения системы нормальных уравнений

$$\delta = (A^T A)^{-1} (A^T l). \quad (11)$$

Элементы преобразования рассчитываются по формулам

$$\begin{cases} m_x = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \\ m_y = \sqrt{b_1^2 + b_2^2} \\ \varphi = \arctg\left(\frac{a_2}{a_1}\right) \\ (\varphi + \varepsilon) = \arctg\left(\frac{-b_1}{b_2}\right). \end{cases} \quad (12)$$

Используя приращения координат, также можно записать следующие формулы для вычисления коэффициентов преобразования:

$$\begin{aligned} A_1 x_i + B_1 y_i + C_1 &= x'_i - x_i \\ A_2 x_i + B_2 y_i + C_2 &= y'_i - y_i \end{aligned} \quad (13)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты точек в старой системе координат;

$x'_i, y'_i$  – координаты точек в новой системе координат;

$A_i, B_i, C_i$  – искомые коэффициенты.

Решение осуществляется по методу наименьших квадратов, вектор неизвестных коэффициентов рассчитывается в два подхода, при которых решение выполняется относительно вектора приращений  $Z_1$ , а затем относительно вектора приращений  $Z_2$ . Получаем два вектора неизвестных коэффициентов, которые в сумме дают 6 коэффициентов преобразования:

$$\begin{aligned} k_1 &= (A^T A)^{-1} A^T Z_1 \\ k_2 &= (A^T A)^{-1} A^T Z_2 \end{aligned} \quad (14)$$

где  $Z_1 = x'_i - x_i$ ,  $Z_2 = y'_i - y_i$ ;

$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}$  – матрица коэффициентов при неизвестных;

$$k_1 = \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{bmatrix}; k_2 = \begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \\ C_2 \end{bmatrix} - \text{векторы неизвестных коэффициентов.}$$

Элементы преобразования рассчитываются по формулам

$$\begin{cases} m_x = \sqrt{(A_1 + 1)^2 + A_2^2} \\ m_y = \sqrt{B_1^2 + (B_2 + 1)^2} \\ \varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{A_2}{A_1 + 1}\right) \\ (\varphi + \varepsilon) = \operatorname{arctg}\left(\frac{-B_1}{B_2 + 1}\right). \end{cases} \quad (15)$$

Оценка точности для всех подходов выполняется по стандартным формулам на основе полученных по методу наименьших квадратов оценок. Апостериорная погрешность единицы веса

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{v^T v}{n - k}}, \quad (16)$$

где  $n$  – количество уравнений,

$k$  – количество определяемых параметров.

Ковариационная матрица  $K_k$  для определяемых параметров

$$K_k = \hat{\sigma}_0^2 \cdot Q. \quad (17)$$

Извлекая корень из диагональных элементов ковариационной матрицы  $K_k$ , получаем стандартные отклонения для соответствующих коэффициентов преобразования

$$\hat{\sigma}_i = \sqrt{(K_k)_{ii}} = \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{Q_{ii}}. \quad (18)$$

Авторами статьи была поставлена цель сравнить алгоритмы имеющихся подходов, выявить возможные преимущества и дать практические рекомендации по их использованию. Эксперимент проводился на основе смоделированных данных (таблица 1). Рассматривались десять точек с известными координатами в старой системе  $OXY$  (рисунок 1). Использовались известные параметры преобразования, относительно которых были вычислены точные значения координат данных точек в новой системе  $O'X'Y'$ . Были сгенерированы случайные числа, имеющие нормальный закон распределения с заданными характеристиками, принимаемые за ошибки, которыми искажались координаты в старой, новой системах.

Таблица 1. – Исходные координаты и параметры связи

Координаты в старой системе		Элементы преобразования	Координаты в новой системе	
$X, \text{ м}$	$Y, \text{ м}$		$X, \text{ м}$	$Y, \text{ м}$
500,000	500,000	угол вращения – $30^\circ$ угол нарушения ортогональности – $3^\circ$ масштаб по $X$ – 1 масштаб по $Y$ – 2 сдвиг по $X$ – 100 м сдвиг по $Y$ – 200 м	-11,625	1288,688
1100,000	1000,000		-36,669	2427,338
400,000	1200,000		-860,715	2412,806
900,000	1600,000		-863,408	3333,766
100,000	1700,000		-1665,153	3101,437
600,000	1800,000		-1341,099	3519,204
1200,000	1400,000		-385,750	3148,252
900,000	2000,000		-1299,131	4004,675
500,000	2200,000		-1863,382	4140,163
1200,000	2000,000		-1039,315	4154,699

Искаженные ошибками новая и старая системы координат использовались для расчета коэффициентов преобразования по трем подходам (см. формулы (5), (10), (13) и таблицу 2). На основе полученных коэффициентов производился расчет элементов преобразования (таблица 3). Результаты оценки точности для трех подходов представлены в таблице 4.

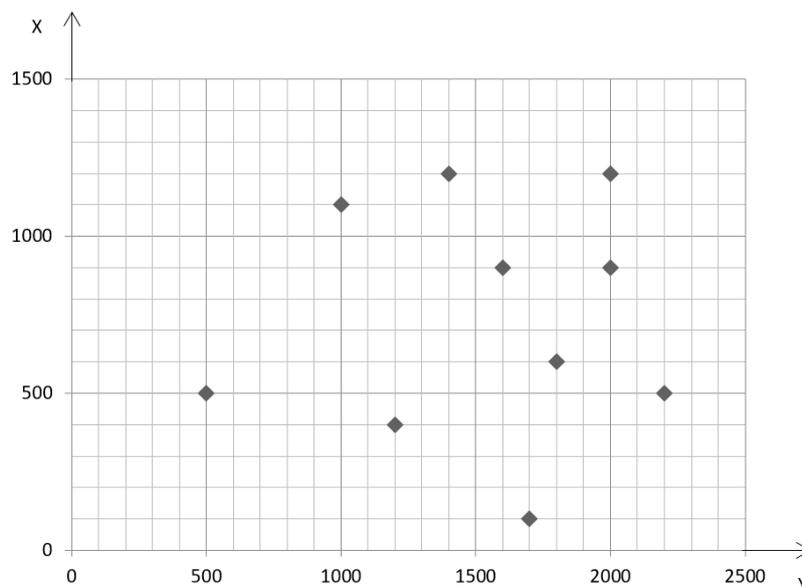


Рисунок 1. – Схема расположения точек в старой системе координат

Таблица 2. – Коэффициенты преобразования, полученные по трем подходам

Первый подход	Второй подход	Третий подход
$k =$	$\delta =$	$k_1 =$
0,86597710	0,86597710 0,50021656	-0,13403390
-1,08927033	-1,08927033 1,67738001	-1,08927033
99,982		99,982
0,50021656		$k_2 =$
1,67738001		0,50021656
199,826		0,67738001
		199,826

Таблица 3. – Элементы преобразования, полученные по трем подходам

Первый подход	Второй подход	Третий подход
$\varphi = 30^{\circ}00'43,7''$	$\varphi = 30^{\circ}00'43,7''$	$\varphi = 30^{\circ}00'43,7''$
$\varepsilon = 2^{\circ}59'13,5''$	$\varepsilon = 2^{\circ}59'13,5''$	$\varepsilon = 2^{\circ}59'13,5''$
$m_x = 1,00006646$	$m_x = 1,00006646$	$m_x = 1,00006646$
$m_y = 2,00002838$	$m_y = 2,00002838$	$m_y = 2,00002838$
$t_x = 99,982$ м		$t_x = 99,982$ м
$t_y = 199,826$ м		$t_y = 199,826$ м

$t_x, t_y$  – сдвиги вдоль оси  $X$  и  $Y$  соответственно.

Таблица 4. – Результаты оценки точности для трех подходов

Первый подход	Второй подход	Третий подход
Апостериорная погрешность единицы веса, м		
$\sigma_0 = 0,0982$	$\sigma_0 = 0,1253$	$\sigma_{01} = 0,0814$ $\sigma_{02} = 0,1125$
Стандартные отклонения для коэффициентов преобразования, м		
$\sigma_i =$	$\sigma_i =$	$\sigma_i =$
0,00008749	0,00003530	0,00007253
0,00006266	0,00002528	0,00005194
0,11718869	0,00003530	0,09714985
0,00008749	0,00002528	0,00010025
0,00006266		0,00007180
0,11718869		0,13426945

**Заключение.** По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

– при одинаковых исходных данных три подхода дают коэффициенты преобразования с одинаковой точностью в трех различных представлениях (таблица 2);

– следует отметить, что во втором подходе отсутствуют коэффициенты, соответствующие сдвигам систем координат, следовательно, сдвиги систем координат получить невозможно, что для чистого трансформирования не имеет никакого значения, но если необходимо иметь представление о модели преобразования, то второй подход не даст необходимых данных;

– в третьем подходе коэффициенты требуют преобразования для расчета элементов трансформирования.

При сравнении размеров образованных матриц плана и матриц свободных членов, необходимых для решения при трех подходах, имеем:

– в первом подходе 20 уравнений координат, матрицу плана размером  $A_{20*6}$ , матрицу-столбец свободных членов  $l_{20*1}$ ;

– во втором подходе 45 уравнений координат, матрицу плана размером  $A_{45*2}$ , матрицу-столбец свободных членов  $l_{45*2}$ ;

– в третьем подходе 10 уравнений координат, матрицу плана размером  $A_{10*3}$ , две матрицы-столбца свободных членов  $Z_{10*1}$ , образованных по разностям абсцисс и ординат старой и новой систем координат.

Второй подход имеет значительно большее количество уравнений и большие размеры матриц плана и свободных членов, что указывает на его большую трудоемкость по сравнению с другими подходами. Следует отметить, что увеличение количества уравнений во втором подходе никак не повлияло на величины полученных коэффициентов преобразования.

Результаты оценки точности показали самую большую величину апостериорной погрешности веса и наименьшие стандартные отклонения для соответствующих коэффициентов преобразования во втором подходе. Хотя величины коэффициентов в трех подходах одинаковые, но наилучшую точность определения коэффициентов дает второй подход.

Таким образом, авторы статьи полагают, что первый подход оптимален для решения задачи трансформирования систем координат, так как имеет полный набор коэффициентов преобразования и не требует составления матриц больших размеров. Однако если есть необходимость в повышении точности коэффициентов преобразования, то такая возможность существует во втором подходе за счет увеличения количества уравнений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлович, К. Геодезия (уравнительные вычисления) / К. Михайлович ; пер. с сербско-хорватского С.В. Лебедева, под ред. В.Д. Большакова. – М. : Недра, 1984. – 448 с.
2. Ghilani, Charles D. Adjustment computations: spatial data analysis / Charles D. Ghilani, Paul R. Wolf Hoboken : JOHN WILEY & SONS, INC., 2006. – 632 с.
3. Мищенко, И.И. Априорная оценка точности некоторых параметров аффинного преобразования плоских прямоугольных координат / И.И. Мищенко, А.В. Зуска // Сборник научных работ Национального горного университета. – 2018. – № 55. – С. 288–296.
4. Голубев, В.В. Геодезия. Теория математической обработки геодезических измерений: учеб. для вузов / В.В. Голубев. – М. : Изд-во МИИГАиК, 2016. – 422 с.

Поступила 15.09.2020

#### ANALYSIS OF APPROACHES TO DECISION OF THE TRANSFORMATION PROBLEM OF COORDINATE SYSTEMS BASED ON DIFFERENT DATA REPRESENTATIONS

*A. DEGTARYOV, A. IVASHNIOVA*

*Often in geodesy there is a problem of replacing the coordinate system with another coordinate system. Today, the need for this procedure is growing, it is connected with the increase of the quantity and quality of information and with the need to integrate of the data from heterogeneous sources. For coordinate transformation from one system to another, a large number of transformation methods have been developed, based on different approaches of data representation and solving algorithms. In this article several approaches to solving the problem are considered based on different representations of data for the coordinate system transformation. It is proposed to use transformation formulas based on the coordinates and on the differences of the coordinates of common points to obtain conversion coefficients. In the article the decision algorithms for the proposed approaches are presented and analyze of the obtained calculation results is performed.*

**Keywords:** *transformation, coordinate system, affine model, transformation elements, least square method.*

УДК 528.7

## ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ В ПРОГРАММЕ AGISOFT PHOTOSCAN

*канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА, канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ,  
П.Ф. ПАРАДНЯ  
(Полоцкий государственный университет)*

*В работе рассмотрены все этапы построения и уравнивания сетей фототриангуляции в программе Agisoft Photoscan, которые включают такие процедуры, как «выравнивание фотографий», «геопривязка» и «оптимизация». Эти термины введены разработчиками программы и совсем не используются в фотограмметрии. Если так называемая калибровка камер разработчиками рассмотрена подробно, то для перечисленных выше процедур не уточняется, каким способом и по каким формулам они выполняются, хотя пользователи программного обеспечения вправе знать, каков алгоритм решения задачи и какие методы используются при выполнении той или иной операции.*

*В нашей работе было выполнено построение сетей фототриангуляции без опорных точек, на основании только координат центров фотографирования (КЦФ), полученных по данным GPS и при разном числе опорных точек. Так как данные GPS были низкой точности, то и точность полученных результатов в сетях без опорных точек оказалась такого же порядка. С нашей точки зрения менее пяти опорных точек в сети быть не должно.*

*После оценки точности полученных результатов определены масштабы и высота сечения рельефа создаваемых планов.*

**Введение.** Для сокращения временных и финансовых затрат на выполнение топографо-геодезических работ в производство активно внедряются новые приборы и технологии. Одним из наиболее перспективных и быстро развивающихся направлений является аэрофотосъемка с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Однако отсутствие на данный момент актуальной нормативно-технической документации в части терминологии, применения современных средств съемки, технологий обработки цифровых данных, как и отсутствие рекомендаций к выбору БПЛА, его съемочной аппаратуры, алгоритмов фотограмметрической обработки и требований к конечным продуктам может негативно сказываться на качестве конечной продукции.

**Основная часть.** Цель данной работы – проанализировать технологии и точность построения сетей фототриангуляции при обработке цифровых снимков, полученных с БПЛА, выявить характерные особенности данных технологий и возможность их использования при выполнении инженерно-геодезических изысканий.

Обработка снимков на цифровых фотограмметрических станциях, например, Photomod [1–3], начинается с загрузки снимков в компьютер, затем наблюдают и измеряют координаты точек на цифровых изображениях. После учета систематических искажений фотоизображений строят сети фототриангуляции либо по способу моделей, как в программе Photomod, либо по способу связей, как в программе ORIMA [4]. В случае, если сети фототриангуляции строят по способу моделей, то выполняют следующие процедуры [1–3]: взаимное ориентирование снимков, в ходе которого получают модель; определение координат точек в моделях; создание модели маршрута; объединение построенных маршрутов в блок; внешнее ориентирование и устранение деформаций в построенных сетях фототриангуляции. При построении сетей фототриангуляции по способу связей сети строят сразу на весь блок.

После построения сетей фототриангуляции создают цифровую модель рельефа (ЦМР), строят горизонтали, затем выполняют ортофототрансформирование и создание ортофотопланов, которые векторизируют [1–3].

В программе Photomod для ускорения процесса предусмотрена возможность построения свободных сетей (без опорных точек). После получения опорных точек блок переуравнивают в выбранной системе координат. Выполненные ранее работы по данным уравнивания трансформируют в заданную систему координат [3].

Как отмечают авторы руководства [5], программа Agisoft Photoscan Pro предназначена для обработки материалов аэрофотосъемки и получения ортофотопланов и цифровых моделей местности. Agisoft Photoscan Pro отличается высокой степенью автоматизации выполняемых операций и не требует специальной подготовки для работы с ней.

Для работы необходимо иметь [5]:

- аэрофотоснимки;
- данные для привязки аэроснимков – координаты центров фотографирования;
- координаты опорных точек с атласом или описанием знаков.

Основные этапы обработки [5] – выравнивание фотографий; привязка моделей в требуемой системе координат; оптимизация.

Выравнивание фотографий включает [5]:

- поиск общих точек на снимках;
- определение элементов взаимного ориентирования снимков;
- формирование первичной модели, состоящей из общих точек (разреженного облака точек).

Как видим, сети строят по способу моделей.

В руководстве [6] о построении сетей фототриангуляции сказано, что на стадии «определения параметров внешнего и внутреннего ориентирования камер» находят общие точки снимков и по ним определяют все параметры камер: положение, ориентацию, внутреннюю геометрию (фокусное расстояние, параметры дисторсии и т.п.). Результатами этого процесса являются разреженное облако общих точек модели и данные о положении и ориентации камер. Далее отмечается, что «во время процесса выравнивания снимков Photoscan оценивает значения параметров внутреннего и внешнего ориентирования камер, в том числе нелинейных радиальных дисторсий» [6]. По общим точкам смежных снимков элементы внутреннего и тем более внешнего ориентирования определить нельзя.

В другом месте руководства [6] авторы пишут, что разреженное облако точек используется для построения модели и служит для визуальной оценки качества выравнивания фотографий. Визуальная оценка и определение параметров ориентирования – разные вещи.

Таких несоответствий в руководстве [6] достаточно. Например: «На этапе выравнивания фотографий Photoscan рассчитывает параметры внутреннего и внешнего ориентирования камер. Эта процедура основана только на данных, содержащихся в изображениях, что может привести к некоторым погрешностям в полученных оценках параметров. Точность окончательных оценок зависит от ряда факторов. Эти ошибки могут привести к нелинейным деформациям итоговой модели». Вне всякого сомнения, без опорных точек сети будут деформированы.

В отличие от программы Photomod и других, где для определения элементов взаимного ориентирования точки выбирают в зонах тройных продольных перекрытий и число их составляет 12–18 на стереопаре [3], при обработке учебно-лабораторного корпуса № 3 Полоцкого государственного университета (ПГУ) в программе Agisoft Photoscan автоматически было набрано значительно большее число точек (более 2000 точек на стереопару [7]) и располагались они на всей площади стереопары, что привело к увеличению времени обработки, хотя в руководстве [6] говорится, что можно уменьшить число точек в облаке путем задания предела связующих точек, но только для разреженного облака.

Нами были выполнены вычисления при разном числе точек на стереопару в разреженном облаке. Время расчета на объект размером 200×45 метров при разном числе точек на стереопару приведено в таблице 1.

Таблица 1. – Время на построение сетей фототриангуляции

Число точек на стереопару	350	1000	2000
Время расчета	6 мин 17 сек	7 мин 22 сек	8 мин 15 сек

Как видим, время вычислений увеличилось незначительно и нет смысла ограничивать число точек в облаке.

Результаты уравнивания при 350 и 1000 точек на стереопару в облаке приведены в таблицах 2–5.

Таблица 2. – Средние квадратические ошибки (СКО) по опорным точкам при 350 точках на стереопару в облаке

Число точек	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	СКО X, Y, см	СКО общая, см
5	2,29	3,29	0,43	4,01	4,03

Таблица 3. – Средние квадратические ошибки по контрольным точкам при 350 точках на стереопару в облаке

Число точек	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	СКО X, Y, см	СКО общая, см
21	4,12	11,98	78,49	12,67	79,51

Таблица 4. – Средние квадратические ошибки по опорным точкам при 1000 точках на стереопару в облаке

Число точек	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	СКО X, Y, см	СКО общая, см
5	3,56	6,44	0,97	7,36	7,42

Таблица 5. – Средние квадратические ошибки по контрольным точкам при 1000 точках на стереопару в облаке

Число точек	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	СКО X, Y, см	СКО общая, см
21	3,79	10,09	39,20	10,77	40,65

Как видим, получили грубые результаты. Однако с увеличением числа точек в облаке точность определения координат точек возрастает. В большей степени число точек влияет на точность определения высот.

После выполнения так называемого «выравнивания фотографий» в руководстве [5] рекомендуют сделать «привязку» модели в требуемой системе координат, которая может выполняться по КЦФ, по координатам опорных точек или по тем и другим.

В руководстве [6] говорится, что при использовании данных GPS о положении камер задание опорных точек не требуется, но отмечают, что опознаки дают более точную привязку. Необходимо минимум три точки [6]. А в другом месте руководства [6] отмечается, что необходимо не менее 10 наземных опорных точек.

Автор работы [8] пишет, что в случае когда нет точных координат центров проекций, необходимы дополнительные опорные точки, и отмечает, что одна точка должна быть на 6–10 базисов съемки.

При съемке корпуса № 3 ПГУ средняя ошибка данных GPS составила 6,3 м [7]. А в работе [8] говорится, что ошибки в определении КЦФ могут достигать 20–30 м. Если бы координаты центров проекций определялись до сантиметров, а углы крена, тангажа и рысканья – с точностью до 0,005° [8], то без опорных точек можно было бы обойтись. Но при использовании оборудования, установленного на беспилотном летательном аппарате MAVIC PRO, без опорных точек получим грубые результаты.

Нами была выполнена обработка результатов съемки корпуса № 3 только по координатам центров фотографирования и при наличии только одной опорной точки кроме КЦФ. Результаты расчетов приведены в таблицах 6 и 7, где указаны средние квадратические ошибки, полученные по контрольным точкам.

Таблица 6. – Результаты построения сетей фототриангуляции без опорных точек

Число точек	СКО X, м	СКО Y, м	СКО Z, м	СКО планового положения, м	Общая СКО, м
26	5,26	6,34	2,59	8,24	8,64

Таблица 7. – Результаты построения сетей фототриангуляции при одной опорной точке

Число точек	СКО X, м	СКО Y, м	СКО Z, м	СКО планового положения, м	Общая ошибка, м
25	0,80	0,86	2,99	1,17	3,22

Как видим, при построении сетей фототриангуляции без опорных точек получили очень низкую точность, а при использовании одной опорной точки, точность планового положения повысилась, но этой точности недостаточно для создания топографических карт и планов. Ошибки определения высотного положения очень велики в обоих случаях, т.е. строить сети фототриангуляции и создавать карты и планы при такой низкой точности нельзя.

GPS-приемник, установленный на дроне MAVIC PRO, имеет низкую точность. Круговая ошибка показаний такого GPS-приемника в плане составляет CE50, два метра при статическом режиме работы, т.е. вероятность точности такого определения координат составляет 50% [9], в то время как в США, где используют круговую ошибку, стандартом точности определения пространственных данных является CE95, т.е. данные определяются с вероятностью 95% [10].

При динамическом режиме работы, что имеет место при съемке с летательных аппаратов, ошибка будет значительно больше.

Если привязка выполняется по КЦФ и по координатам опорных точек, то необходимо учитывать веса измерений. Учитываются ли в программе Agisoft Photoscan веса измерений на этом этапе – неизвестно. Во всяком случае, упоминаний об этом в руководствах [5] и [6] нет. Однако программа по умолчанию задает точность КЦФ – 10 м, точность определения углов – 10°, точность определения опорных точек – 5 мм. В руководстве [6] упоминается о весовых коэффициентах на завершающем этапе работы в процедуре «оптимизация».

Как правило, КЦФ загружаются вместе со снимками и используются на этапе выравнивания, а координаты опорных точек загружаются после формирования первичной модели и по ним производится точная привязка [5].

На этапе «геопривязки» модель подвергается линейным преобразованиям с использованием семи параметров преобразования (трех параметров трансляции, трех параметров вращения и одного параметра растяжения/сжатия) [5].

Термин «трансляция» в основном относится к теле- и радиопередачам [11]. Но есть и другая его трактовка [11]: «перенос объекта в пространстве на некоторое расстояние параллельно самому себе вдоль прямой». Термин «трансляция» совсем не используется в фотограмметрии.

Три параметра вращения следовало бы назвать наклоном и поворотом модели по отношению к принятой системе координат.

Похоже, под растяжением и сжатием подразумевают изменение масштаба построенной модели и отмечают, что такие преобразования могут компенсировать только линейные искажения модели [5]. Результат нелинейных искажений не может быть устранен в рамках такого подхода. Как правило, это является основной причиной возникновения ошибок при выполнении геопривязки модели [5].

В фотограмметрии вместо термина «геопривязка» используется «внешнее ориентирование сети фототриангуляции». Так называемую геопривязку модели иллюстрирует рисунок.

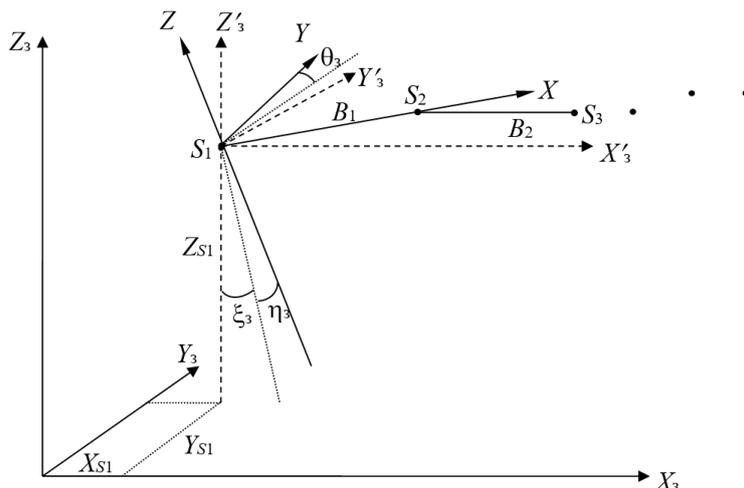


Рисунок. – Внешнее ориентирование сети фототриангуляции

На приведенном рисунке:

- $X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}$  – координаты начала фотограмметрической системы координат;
- $X'_3, Y'_3, Z'_3$  – оси вспомогательной системы координат, параллельны осям заданной системы координат  $X_3, Y_3, Z_3$ ;
- $\xi_3$  – продольный угол наклона построенной модели сети; составлен проекцией оси  $Z$  на плоскость  $X'_3Z'_3$  с осью  $Z'_3$ ;
- $\eta_3$  – поперечный угол наклона сети составленный осью  $Z$  и ее проекцией на плоскость  $X'_3Z'_3$ ;
- $\theta_3$  – угол поворота модели (угол между осью  $Y$  и следом плоскости  $Z'_3Y'_3$  на плоскость  $XY$ );
- $t_3$  – масштабный коэффициент.

Внешнее ориентирование определяется семью элементами:  $X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}, \xi_3, \eta_3, \theta_3, t_3$ . Для их определения составляют уравнения связи координат [12]:

$$\begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{S1} \\ Y_{S1} \\ Z_{S1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} t_3, \quad (1)$$

где  $a_i, b_i, c_i$  – направляющие косинусы, вычисляемые через углы  $\xi_3, \eta_3, \theta_3$ .

Уравнения поправок составляют на основе формулы (1) и они имеют вид [12]

$$a_x \delta X_{S_2} + d_x \delta \xi + e_x \delta \eta + f_x \delta \theta + g_x \delta t + l_x = v_x, \quad (2)$$

$$b_y \delta Y_{S_2} + d_y \delta \xi + e_y \delta \eta + f_y \delta \theta + g_y \delta t + l_y = v_y, \quad (3)$$

$$c_z \delta Z_{S_2} + d_z \delta \xi + e_z \delta \eta + f_z \delta \theta + g_z \delta t + l_z = v_z, \quad (4)$$

где  $a, b, c, \dots$ , коэффициенты, которые получают решая формулы частных производных уравнений (1) по соответствующим параметрам;

$\delta$  – поправки к величинам, полученным в ходе построения сетей фототриангуляции.

Для определения неизвестных элементов ориентирования  $X_{SI}, Y_{SI}, Z_{SI}, \xi_3, \eta_3, \theta_3, t_3$  необходимы опорные точки. Так как число неизвестных семь, а каждая опорная точка позволяет составить три уравнения вида (2), (3) и (4), то для решения задачи требуется не менее трех опорных точек.

При использовании трех опорных точек будем иметь девять координат, в формулах (2–4) семь неизвестных, поэтому после внешнего ориентирования на опорных точках тоже могут быть расхождения, которые в дальнейшем должны быть устранены. Нелинейные искажения проявляются при числе опорных точек более трех.

Авторы руководства [5] отмечают, что результат нелинейных искажений является основной причиной возникновения ошибок при выполнении геопривязки модели. Дело здесь не в геопривязке, а в деформации сетей фототриангуляции.

Сколько бы точек не было задано, задача решается по способу наименьших квадратов. Т.е. на основе системы уравнений вида (2–4) составляют нормальные уравнения, в ходе решения которых получают поправки к приближенным значениям элементов внешнего ориентирования, прибавив которые к приближенным величинам, получают элементы внешнего ориентирования относительно заданной системы координат. Полученные элементы внешнего ориентирования используют для вычисления координат всех точек блока в заданной системе координат. А как решается задача в программе Agisoft Photoscan – трудно сказать.

Ход решения задачи при взаимном ориентировании аналогичен изложенному решению. Какая система элементов взаимного ориентирования принята в программе Agisoft Photoscan, описанной в руководствах пользователей [5; 6], неизвестно.

При взаимном ориентировании тысячи точек, тысячи уравнений поправок (только на одной стереопаре 2000 точек) поиск обратных матриц – задача сложная.

При съемке корпуса ПГУ продольное перекрытие составило 62,7–92,9%, а поперечное перекрытие – 43,2%, т.е. проценты продольного и поперечного перекрытий велики. Следовательно, одноименные точки на смежных снимках находились в разных их частях. Кроме того, число точек, приходящееся на стереопару, – более 2000, и разработчики программы Agisoft Photoscan, вероятно, посчитали, что перечисленных точек достаточно, чтобы выявить все ошибки, исправить измеренные координаты точек, чтобы сеть не была деформирована. Действительно, систематические искажения оказывают разное влияние в зависимости от положения точек, да и точки попадают более чем в двойное перекрытие. Возможно, проанализировав эти искажения и можно определить систематические искажения, обусловленные разными факторами. Так что в руководствах [5; 6] правильнее было бы написать не «калибровка камер», а «определение систематических ошибок фотоизображений, обусловленных разными факторами», как и названы такие систематические ошибки в работе [13].

Задача строгого уравнивания блочной фототриангуляции сводится к решению больших систем нелинейных уравнений. Системы уравнений можно решать либо прямыми, либо итеративными методами. Прямые методы имеют следующие преимущества по сравнению с итеративными методами [14]:

- 1) возможность обоснованной оценки точности построений параллельно с решением основной задачи – уравниванием сети;
- 2) значительно меньший объем вычислительных операций, не зависящий от степени обусловленности системы.

Итеративный метод (например, способ сопряженных градиентов), также позволяет оценить точность окончательных результатов. Итеративные методы позволяют использовать исходную матрицу частных производных, не преобразуя ее в процессе решения [15]. Основная операция в итеративных методах – умножение матрицы на вектор.

Какой способ уравнивания использовали разработчики программы Agisoft Photoscan тоже неизвестно.

Разработчики программы вводят незнакомый для фотограмметристов термин «оптимизация» и поясняют [5; 6], что, по сути, «оптимизация» является строгим уравниванием параметров ориентирования снимков. Почему тогда не назвали эту процедуру «уравнивание сетей фототриангуляции»? Авторы руководства [5; 6] рекомендуют для достижения более качественных результатов оптимизации отредактировать разреженное облако точек, заранее удалив неверные точки. Однако выполнить ручное редактирование при наличии на каждой стереопаре более 2000 точек весьма проблематично.

Как отмечено в руководстве [6], возможные нелинейные искажения, возникающие на этапе выравнивания, можно устранить, оптимизировав разреженное облако точек и параметры калибровки камеры на основе известных значений опорных координат. В процессе оптимизации Photoscan пересчитывает координаты точек и параметры камер, минимизируя сумму ошибок проецирования и ошибок выравнивания по опорным координатам (наземных точек опоры и/или координатам камер) [6].

Далее в руководстве [5] отмечают, что оптимизация производится на основе данных о положениях центров фотографирования и наземных опорных знаков. Если точность GPS-данных оказалась низкой, как в нашем случае, то их использование при оптимизации не окажет существенного влияния на конечный результат. Значения точности КЦФ, координат опорных точек, точности связующих точек используются в качестве весовых коэффициентов при уравнивании [5].

Авторы руководства [5] отмечают, что строгое уравнивание в программе Photoscan выполняется при оптимизации. Оптимизация проводится по КЦФ и/или координатам опорных точек.

В качестве параметров оптимизации используются значения точности КЦФ, координат опорных точек, точности связующих точек [5]. Каким образом определяют точность связующих точек – не описывается. Перечисленные значения точности используются в качестве весовых коэффициентов при уравнивании [5].

Грубое уравнивание (используется при обновлении данных привязки) выполняется практически мгновенно. Оптимизация – более ресурсоемкая процедура и занимает заметное время [5]. Однако при вычислениях в программе Agisoft Photoscan время на поиск соответствий составило 8 мин 4 сек, а время на оптимизацию – 2 сек.

В отчете по уравниванию есть пояснение: параметры оптимизации –  $f, c_x, c_y, k_l-k_3$ . Формулы для определения этих параметров приведены в руководстве [6]. Поиск параметров  $f, c_x, c_y, k_l-k_3$  и уравнивание – разные процессы. За 2 с выполнить уравнивание невозможно. Сами авторы руководства [6] отмечают, что уравнивание занимает заметное время. Похоже, программа применила грубое уравнивание.

В случаях, когда точность КЦФ и опорных точек значительно отличается, рекомендуется сначала выполнить оптимизацию по КЦФ, а затем окончательную оптимизацию только по маркерам [5]. Маркеры, надо полагать, – это опорные точки.

Авторы руководства [6] отмечают, что «уравнивание при строгом способе – полиномиальное». Оставшиеся после построения сетей фототриангуляции расхождения координат опорных точек, которые являются следствием возможных деформаций, устраняют при помощи разного рода полиномов, например [12]:

$$\delta X = A_0 + A_1 X + A_2 Y + A_3 XY + A_4 X^2 + A_5 X^3 + \dots, \quad (5)$$

$$\delta Y = B_0 + B_1 X + B_2 Y + B_3 XY + B_4 X^2 + B_5 X^3 + \dots, \quad (6)$$

$$\delta Z = C_0 + C_1 X + C_2 Y + C_3 XY + C_4 X^2 + C_5 X^3 + \dots, \quad (7)$$

где  $A_i, B_i, C_i$  – коэффициенты;

$X, Y, Z$  – координаты точек построенной сети фототриангуляции;

$\delta X, \delta Y, \delta Z$  – поправки в координаты точек построенных сетей фототриангуляции.

В уравнениях (5)–(7) три первых члена устраняют ошибки внешнего ориентирования, четвертый и последующие – устраняют деформации построенной модели.

Для решения задачи по опорным точкам находят расхождения координат опорных точек, определенных в поле и полученных после внешнего ориентирования  $\delta X, \delta Y$  и  $\delta Z$ , составляют уравнения вида (5)–(7), в которых неизвестными будут коэффициенты  $A_i, B_i, C_i$ , затем – нормальные уравнения, в ходе решения которых будут получены искомые коэффициенты. Эти коэффициенты используют для исправления координат всех точек сети по формулам (5)–(7).

При использовании трех опорных точек можно задействовать только первые три члена формул (5)–(7) и т.д. Чем больше опорных точек, тем большая длина полинома может быть использована.

Уравнивание сетей фототриангуляции выполнялось нами в программе Agisoft Photoscan при разном числе опорных точек. Масштаб снимков 1 :  $m$  составил 1:11000. Высота полета  $H = 52$  м. Сделано четыре маршрута съемки. Минимальное продольное перекрытие 62,7%, максимальное – 92,9%. Минимальное поперечное перекрытие 43,2%, максимальное – 72,8%.

Результаты уравнивания по опорным точкам приведены в таблице 8.

Таблица 8. – Оценка точности сетей фототриангуляции по опорным точкам в программе Agisoft Photoscan

Число опорных точек	СКО $X$ , см	СКО $Y$ , см	СКО $Z$ , см	СКО планового положения, см	Число контрольных точек
3	0,77	0,32	0,08	1,08	23
4	1,68	1,43	0,12	2,21	22
5	7,78	16,43	2,86	18,18	21

Как видим, на опорных точках получили ошибки, отличные от нуля.

Если длину полинома задать в зависимости от числа опорных точек, то после использования полиномов на опорных точках могут быть небольшие ошибки, обусловленные погрешностями округлений (например, в миллиметрах), особенно если применялся итеративный метод вычислений, или в случае, если

есть избыточные опорные точки (но в нашем случае избыточных опорных точек нет, а ошибки значительные). И, как видим, чем больше опорных точек в сети, тем больше ошибки, чего быть не должно. В идеале на опорных точках вообще не должно быть ошибок, даже если какая-то опорная точка неправильно определена, что следует из анализа формул (5–7). Возможно, разработчики программы Agisoft Photoscan использовали какой-то «модифицированный» полином.

При обработке рассматриваемых снимков того же объекта в программе ContextCapture получили среднюю квадратическую ошибку планового положения  $m_d = 1,26$  см, а высотного положения –  $m_z = 0,001$  см, т.е. в ContextCapture уравнивание по полиномам выполнялось.

Для контроля точности уравнивания сети используют контрольные точки. Более того, проанализировав расхождения на контрольных точках, можно определить, какая из опорных или контрольных точек была ошибочно определена.

Результаты уравнивания с контрольными точками приведены в таблице 9.

Таблица 9. – Оценка точности сетей фототриангуляции по контрольным точкам в программе Agisoft Photoscan

Число опорных точек	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	СКО планового положения, см	Число контрольных точек
3	5,83	12,77	15,89	14,04	23
4	6,64	12,49	17,90	14,15	22
5	5,00	11,50	10,26	12,54	21

И по контрольным точкам получили значительные ошибки, хотя размеры объекта съемки малые. Как видим, ошибка по высоте при четырех опорных точках составила 18 см. Меньше пяти членов уравнений (5)–(7) задействовать нельзя. В сети должно быть не менее пяти опорных точек в случае, когда координаты центров фотографирования определены грубо.

В работе [16] сети фототриангуляции также строились в программе Agisoft Photoscan. Съемка была выполнена на специальном тщательно подготовленном полигоне с высоты полета  $H = 600$  м. Она осуществлялась цифровой камерой One Plase IXU150 с фокусным расстоянием  $f = 55$  мм. Масштаб фотографирования 1:11000. Продольное перекрытие  $P = 80\%$ . Опорных точек было 5, контрольных – 44. Все точки полигона замаркированы. СКО определения этих точек составили два сантиметра по всем трем координатам. Результаты уравнивания сетей фототриангуляции приведены в таблице 10.

Таблица 10. – Результаты уравнивания

СКО на опорных точках			СКО на контрольных точках		
СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см
4,5	4,2	5,7	4,5	4,0	20,4

Как видим, и здесь получили расхождения, как в плановом положении, так и по высоте на опорных и контрольных точках, особенно по высоте.

Ошибки на опорных точках после уравнивания будут тогда, когда опорных точек много, а принятая длина полинома малая, то есть когда есть избыточные измерения. Проанализировав ошибки на контрольных точках, можно выявить, какая из опорных точек ошибочна. Контрольные точки не только показывают, есть ли ошибки на опорных точках, но и контролируют качество построения сетей.

Определим, каких масштабов и с какой высотой сечения рельефа можно создать планы по результатам съемки корпуса № 3 ПГУ по данным точности, полученной после уравнивания сетей фототриангуляции.

Согласно основным положениям по созданию топографических планов [17], плановое положение капитальных строений должно быть отображено со средней ошибкой 0,4 мм в масштабе плана. Средняя ошибка по высоте равна 1/4 принимаемой высоты сечения рельефа при угле наклона местности до  $2^\circ$  [17]. Следовательно, все промежуточные этапы (фототриангуляция, создание ЦМР, ортотрансформирование, векторизация) должны выполняться точнее. Да и планово-высотные точки тоже содержат ошибки. Примем, что сети фототриангуляции должны строиться в два раза точнее, то есть со средней ошибкой 0,2 мм на плане, что на местности составит  $V=0,2M$ , где  $M$  – знаменатель масштаба создаваемого плана (карты). По высоте среднюю ошибку примем равной 1/8 высоты сечения рельефа.

Формула перехода от средних ошибок  $V$  к среднеквадратическим ошибкам  $m$  имеет вид [18]

$$m = 1,25V . \quad (8)$$

Для планов разных масштабов будем иметь средние и среднеквадратические ошибки, приведенные в таблице 11.

Таблица 11. – Средние и среднеквадратические ошибки на местности для точек, полученных после фототриангуляции для планов разных масштабов

М	200	500	1000	2000
$V_d$ , см	4	10	20	40
$m_d$ , см	5	12,5	25	50

В ходе уравнивания мы получили среднюю квадратическую ошибку  $m_d = 13$  см в плане и примерно 10 см по высоте  $m_z$  при пяти опорных точках, т.е. мы сможем создать с требуемой точностью планы масштаба 1:1000 и мельче.

Рассмотрим, какие высоты сечения рельефа  $h$  можно задать при создании планов. Примем высоты сечения рельефа  $h = 0,25; 0,5; 1,0$  и  $2,0$  метра. Мы приняли, что сети фототриангуляции необходимо строить при средней ошибке по высоте  $1/8 h$ . Результаты расчетов средних и среднеквадратических ошибок для разных высот сечения рельефа приведены в таблице 12.

Таблица 12. – Средние и среднеквадратические ошибки точек в сетях фототриангуляции для разных высот сечения рельефа

$h$ , м	0,25	0,5	1,0	2,0
$V_h=1/8 h$ , см	3,12	6,25	12,5	25,0
$m_h=1,25 V_h$ , см	3,90	7,81	15,62	31,25

Сопоставим полученные значения с данными таблицы 9, где СКО зависят от числа опорных точек. В случае пяти опорных точек может быть обеспечена точность создания планов с высотой сечения рельефа 1 м, а в остальных случаях – с высотой сечения рельефа 2 м. Впрочем, уверенности в том, что при трех опорных точках были получены качественные результаты, нет. Нельзя выполнять уравнивание сетей фототриангуляции при числе точек менее пяти, если КЦФ определены с низкой точностью.

С учетом того, что последующие работы (создание ЦМР, ортотрансформирование и векторизация) будут тоже содержать ошибки, получим требуемые в работе [17] допуски.

Приведенные в таблице 12 данные показывают, что их возможно использовать для инженерно-геодезических изысканий в масштабах 1:1000 и мельче с высотой сечения рельефа 1 м.

**Заключение.** Выполнив анализ построенных сетей фототриангуляции, мы пришли к выводу, что две опорные точки грубо определены: одна по высоте, другая – в плановом положении. Поменяв опорные точки и исключив одну плановую опорную точку, грубо определенную из уравнивания, получили СКО, приведенные в таблице 13.

Таблица 13. – Результаты уравнивания

СКО на опорных точках				СКО на контрольных точках			
СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	$m_d$ , см	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	$m_d$ , см
2,5	1,3	1,0	2,8	3,0	3,5	4,1	4,6

Сопоставив данные таблицы 13 с данными таблиц 11 и 12 видим, что можно создать планы масштаба 1 : 200 с высотой сечения рельефа 0,5 м. При этом необходимо тщательно анализировать результаты построения сетей фототриангуляции, чтобы получить более качественные результаты. Для выполнения такого анализа необходимо не только знание фотограмметрии, но и опыт работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Программа «PHOTOMOD AT» : руководство пользователя. – М. : Ракурс, 1999. – 69 с.
2. «PHOTOMOD 3.0» : руководство пользователя. – М. : Ракурс, 1999.
3. «PHOTOMOD 3.5.24» : руководство пользователя. – М. : Ракурс, 2013.
4. ORIMA Software, Rel./1.50. User's Guide. – Leica AG, 1996. – 250 p.
5. Обработка материалов аэросъемки в Agisoft Photoscan Pro. Получение ортофотопланов. Получение матриц высот (DSM) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://download.geoscan.aero/public/Agisoft\\_PhotoScan\\_Pro.pdf](https://download.geoscan.aero/public/Agisoft_PhotoScan_Pro.pdf). – Дата доступа: 10.01.2020.
6. Agisoft Photoscan : руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_2\\_ru.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf). – Дата доступа: 10.01.2020.
7. Михеева, А.А. Калибровка снимков в программах Agisoft Photoscan и ContextCapture. / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов, П.Ф. Парадня // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. 2019. – № 8. – С. 121–127.
8. Сечин, А.Ю. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэросъемки для картографирования (часть 2) [Электронный ресурс] / А.Ю. Сечин, М.А. Дракин, А.С. Киселева. – Режим доступа: <https://russiadrone.ru/publications/bespilotnyy-letatelnyy-apparat-primenenie-v-tselakh-aerosyemki-dlya-kartografirovaniya-chast-2/> – Дата доступа: 10.01.2020.

9. ГЛОНАСС/GPS модуль NEO-M8N/M [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://microem.ru/produkti/besprovodnie-tehnologii/glonass-gps-modul-lea-7n/>. – Дата доступа: 10.01.2020.
10. Титаров, П.С. Характеристики точности координат точек местности – СЕ и LE / П.С. Титаров // Геопрофи. – 2010. – № 1. – С. 52–53.
11. Советский энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М. : Сов. энцикл., 1985. – 1600 с.
12. Михеева, А.А. Фотограмметрия (цифровая фотограмметрия) : учеб.-метод. комплекс для студ. специальности 1-56 02 01 «Геодезия» / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов. – Новополоцк : ПГУ, 2016. – 140 с.
13. Антипов, И.Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции / И.Т. Антипов. – М. : «Картгеоцентр» – «Геодезиздат», 2003. – 296 с.
14. Погорелов, В.В. Уравнивание маршрутной фототриангуляции строгим способом : реферат / В.В. Погорелов // Сб. ОНТИ ЦНИИГАиК. – М., 1971. – № 15. – С. 76–84.
15. Красиков, В.А. Применение метода сопряженных градиентов при строгом уравнивании фотограмметрических сетей. Реферат / В.А. Красиков // Сб. ОНТИ ЦНИИГАиК. – М., 1971. – № 15. – С. 84–97.
16. Испытательный полигон МИИГАиК для тестирования, калибровки и сертификации беспилотных летательных систем / А.Г. Чибуничев [и др.] // Геодезия, картография, кадастр, ГИС – проблемы и перспективы развития : материалы междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. – Новополоцк, 2016. – С. 36–47.
17. ГКНП 02-004-2010. Основные положения по созданию топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. / Комитет по земельным ресурсам, геодезии и картографии при Совете Министров Республики Беларусь. – Минск : БелНИЦзем, 2010. – 33 с.
18. Большаков, В.Д. Справочник геодезиста : в 2 кн. / В.Д. Большаков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : «Недра», 1975. – 1056 с.

Поступила 18.09.2020

## CREATING PHOTOTRIANGULATION NETWORKS IN AGISOFT PHOTOSCAN

A. MIKHEEVA, V. YALTYKHOV, P. PARADNYA

*The paper describes the stages of creation and adjustment of phototriangulation networks in Agisoft Photoscan, which includes “photo alignment”, “georeferencing” and “optimization”. These terms were introduced by the program developers and are not used in photogrammetry at all. So-called camera calibration is considered in detail by developers, but for the procedures listed above it is not specified in what way and by what formulas they are performed, although software users have the right to know what is the algorithm for solving the problem and what methods are used when performing this or that operation.*

*In our work, we built phototriangulation networks without ground control points, based only on the coordinates of the photographing centers, obtained from GPS data and with a different number of control points. Since the GPS data was of low accuracy, the accuracy of the results obtained in networks without control points was low as well. In our opinion, there should not be less than five control points in the network.*

*After evaluating the accuracy of the results obtained, the scales and height of the relief section of the created plans were determined.*

**Keywords:** *aerial photograph, phototriangulation, reference points, elements of external orientation, adjustment.*

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК.504.5+502.521

### ОЦЕНКА ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ УГЛЕВОДОРОДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ

**Н.А. КОВАЛЕВСКАЯ**

*(Витебский государственный университет им. П.М. Машерова);*

*канд. техн. наук, доц. В.Е. САВЕНОК, А.П. ЗЯЗЮЛЬКИН*

*(Витебский государственный технологический университет)*

*Проанализированы существующие численные методы оценки загрязнения почв техногенных ландшафтов нефтепродуктами, определен опытным путем коэффициент пористости различных типов почв, с помощью которого производится прогнозная оценка их нефтяного загрязнения. Получены опытным путем значительные коэффициенты пористости, позволяющие определить коэффициенты фильтрации для типов почв, характерных для техногенных ландшафтов Витебской области. Полученные результаты определения коэффициента пористости почв могут быть использованы как при проведении прогнозной оценки возможных последствий нефтяного загрязнения почв, так и непосредственно учтены при ликвидации произошедших аварийных разливов нефти на естественных и техногенных ландшафтах.*

**Ключевые слова:** *метод, нефть, оценка, почва, прогноз, расчет.*

**Введение.** Растущие темпы развития современной промышленной и хозяйственной деятельности человека ведут к постоянному увеличению техногенной нагрузки на природную среду. Наиболее распространенными ее загрязнителями являются нефть и нефтепродукты, которые служат универсальным источником энергии во всех сферах хозяйственной деятельности. Эксплуатационные и аварийные разливы нефти и нефтепродуктов приводят к загрязнению почвы и воды.

Для снижения негативных последствий углеводородного загрязнения природной среды используются различные способы и методы. Среди основных элементов оценки прогнозного или фактического нефтяного загрязнения воды и почвы следует отметить численные методы исследования углеводородного загрязнения объектов природной среды.

Целью данной работы является анализ существующих численных методов оценки загрязнения почв техногенных ландшафтов нефтепродуктами, определение опытным путем коэффициента пористости различных типов почв, с помощью которого производится прогнозная оценка их нефтяного загрязнения. При проведении исследований применялись сравнительно-сопоставительный и вычислительный методы.

Установлено, что нефть, попадая на поверхность почвы, растекается под действием капиллярных и поверхностных сил, проникая в поры между частицами грунта, и одновременно распространяется вертикально вниз под действием гравитационных сил. При единовременном разливе нефти насыщенность грунта снижается в связи с фильтрацией в нижние слои почвы. С уменьшением доли нефти в многофазной системе труднее происходит фильтрация в грунте, а достигнув содержания 10–12%, нефть становится неподвижной. Миграция углеводородов в почве рассматривается как результат отдельных механизмов конвекции, диффузии, дисперсии, адсорбции и биохимической деградации [1].

Несмотря на существование значительного количества математических моделей фильтрации и распространения загрязнителя в почве, в исследованиях по данной тематике еще не представлено адекватных специализированных моделей оценки степени загрязнения почвенных сред, которые бы позволили определить динамику миграции углеводородов нефти, фильтрующихся с поверхности земли, и установить закономерности изменения зоны нефтяного загрязнения, а также учитывать поведение фаз и их свойства. Опираясь на свойства и характеристику почв, проводят оценку их экологического состояния и функционирования. М.В. Зильберманом было отмечено [2], что содержание нефтепродуктов в почве нельзя рассматривать как единственный показатель загрязнения. Согласно многочисленным исследованиям, существенное влияние на биологические объекты оказывает не только концентрация нефти и нефтепродуктов в почве, но и характер взаимодействия данных загрязнителей с почвенной массой как абиотическим фактором. При рассмотрении данной системы наблюдается процесс адсорбции, который зависит от структуры порового пространства. Наряду с этим происходит многоступенчатая трансформация углеводородов нефти и нефтепродуктов, которая сопровождается процессом окисления с образованием ряда соединений: альдегидов, кетонов, спиртов и кислот. Однако данные соединения, установленные в ходе химического анализа, не будут определены как продукты окисления углеводородов нефти, а их нахождение в почвенном профиле будет негативно сказываться на биологических объектах. Таким образом, различные концентрации углеводородов нефти и нефтепродуктов и почвенных углеводородов оказывают неодинаковое воздействие на биотический фактор почвенной среды.

С учетом вышесказанного ясно, что объективная оценка воздействия нефтяного загрязнения почвы на экологическое состояние территорий может быть дана только на основе комбинации методов химического анализа, исследования физических характеристик почв и биотестирования.

Одним из главных показателей, согласно [3], является концентрация нефтепродуктов  $\alpha$  (г/кг) в грунте. Она определяется по формуле

$$\alpha = \frac{M_{\text{вг}}}{M_{\text{г}}} \cdot 10^3, \quad (1)$$

где  $M_{\text{вг}}$  – нефтенасыщенность грунта, т.е. количество нефти, впитавшейся в грунт, т;  
 $M_{\text{г}}$  – количество нефтезагрязненного грунта, т.

В данной формуле используется показатель нефтенасыщенности (нефтеемкости) грунта, его значение определяют инструментальным методом или экспериментальным путем, с учетом значений влажности грунта. Количество низкомолекулярных углеводородов  $M_{\text{из}}$  (кг), испарившихся с поверхности нефти, разлившейся по поверхности земли при масштабных разливах, может быть рассчитано по формуле

$$M_{\text{из}} = q_3 F_3 10^{-3}, \quad (2)$$

где  $q_3$  – удельная величина выбросов углеводородов в атмосферу с поверхности нефти, разлившейся по земле, кг/м<sup>2</sup>;

$F_3$  – площадь загрязнения, м<sup>2</sup>.

Удельная величина выбросов углеводородов определяется по табличным данным в зависимости от следующих величин [8]:

- толщина слоя свободной нефти на поверхности земли;
- продолжительность процесса испарения свободной нефти с поверхности земли;
- средняя температуры поверхности испарения при испарении нефти с поверхности земли.

При определении нефтепродуктов в почве необходимо обязательно учитывать содержание органических соединений самой почвы, так как существуют методы определения накопления нефтепродуктов по содержанию органического углерода. Изначально вычисляют суммарную долю углерода, входящего в состав нефти, а затем вводят поправочный коэффициент накопления нефтепродуктов в почве для сравнительной характеристики загрязненных районов.

Вопрос проникновения углеводородного загрязнителя в грунт рассматривался многими авторами. Так, Н.В. Молоковой [4] представлена математическая модель двухфазной фильтрации, учитывающая движение углеводородных загрязнителей и воздуха в почвенных средах. При проникновении нефти в почву наблюдается процесс фильтрации несмешивающихся фаз. Однако данная модель применима только для верхних однородных слоев почвы. В ходе построения модели учитываются следующие принятые допущения: загрязнитель – несжимаемая жидкость, почва однородна, течение загрязнителя направлено вертикально вниз (вдоль оси Z). Под скоростью линейной фильтрации  $u$  (м/с) понимают объем жидкости, протекающей в единицу времени через единичную площадку пористой среды, перпендикулярно направлению потока:

$$u = \frac{Q}{F} = \frac{k \Delta p}{\mu L}, \quad (3)$$

где  $Q$  – объемный расход жидкости в единицу времени, м<sup>3</sup>/с;

$\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с,

$F$  – площадь фильтрации, м<sup>2</sup>;

$\Delta p$  – внешний перепад давления, Па;

$L$  – длина образца пористой среды, м.

Основными уравнениями, описывающими движение жидкости в пористой среде, являются уравнение неразрывности и закон фильтрации Дарси. С учетом характеристики пористой структуры грунта уравнение неразрывности в декартовой 3-мерной системе координат, описывающее движение углеводородного загрязнителя (однородная жидкость в недеформируемом грунте) и воздуха, может быть представлено системой уравнений

$$m \frac{\partial s}{\partial t} + \left[ \frac{\partial(\rho_1 u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_1 u_z)}{\partial z} \right] = 0; \quad (4)$$

$$m \frac{\partial(1-s)}{\partial t} + \left[ \frac{\partial(\rho_2 u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_2 u_z)}{\partial z} \right] = 0,$$

где  $s$  – насыщенность пористой среды;

$m$  – пористость материала;

$\rho$  – плотность;

$u(u_x, u_y, u_z)$  – вектор скорости фильтрации;

$u_x, u_y, u_z$  – компоненты вектора фильтрации;

$x, y, z$  – координаты;

$t$  – время.

Закон фильтрации (закон Дарси) может быть записан в виде

$$\begin{aligned} u_1 &= -k \frac{k_1(s)}{\mu_1} (\nabla p_1 - \rho_1 \vec{g}); \\ u_2 &= -k \frac{k_2(s)}{\mu_2} (\nabla p_2 - \rho_2 \vec{g}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $k$  – проницаемость пористой среды;

$\mu_i$  – динамическая вязкость  $i$ -й фазы;

$p_i$  – давление  $i$ -й фазы;

$\rho_1, \rho_2$  – плотность 1-й и 2-й фазы соответственно;

$k_i(s)$  – относительная фазовая проницаемость  $i$ -й фазы;

$\vec{g}$  – вектор ускорения свободного падения;

индексы 1 и 2 относятся к загрязнителю и воздуху соответственно.

На основании модели процесса фильтрации загрязнителей в поровом пространстве исследуется интенсивность и характер поступления углеводородов нефти с учетом влияния внешних факторов среды.

С.К. Муратова [5] также исследовала процесс фильтрации загрязнителя в почве принимая во внимание состав воды, ее состояние в поровом пространстве и свойства дисперсных частиц грунта. Учитывая, что движущей силой нефти в пористой среде являются поверхностные явления между нефтью и водой, процесс фильтрации нефти в почвах рассматривается как послойное движение. Вода выполняет роль «транспорта» нефти и нефтепродуктов, следовательно, нужно рассчитать удельное количество воды в поровом пространстве  $q$  ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ) с учетом дисперсных частиц грунта:

$$q = 10^{-2} \frac{\rho_v}{\rho_r} m [\varphi_0 - \varphi - W_M], \quad (6)$$

где  $\rho_v$  – плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\rho_r$  – плотность грунта,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$m$  – пористость грунта,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$\varphi_0$  – относительная влажность грунта, %;

$W_M$  – максимальная молекулярная влагоемкость дисперсных частиц размером менее 0,1 мм, %;

$\varphi$  – массовое процентное содержание частиц в поровом пространстве размером менее 0,1 мм, %.

В работе Т.С. Шориной [6] представлены результаты урезной активности почв на примере черноземов и установлено, что нефть даже при незначительной концентрации стимулирует активность уреазы. На основании полученных данных автор делает вывод, что стимулирующее действие обусловлено повышением содержания углерода в почве и ведет к активизации азотного обмена. Выявляют изменение кинетики ферментативных реакций природно-технической системы, возникшей при загрязнении почвы нефтью. Критерием степени нарушения экологических функций почвы служит интегральный показатель биологического состояния почв.

Для выявления участков с высокой степенью нефтяного загрязнения создаются и исследуются геофильтрационные математические модели. При исследовании загрязнения почвы компонентами нефти наблюдается процесс фильтрации несмешивающихся фаз. Из трех фаз (углеводород, вода, газ), насыщающих пористую среду, подвижной считается только фаза загрязнителя. Это объясняется тем, что подвижность воздуха высока, так что его давление можно считать атмосферным. Вода же капиллярно связана, следовательно, ее количество в почве постоянно [7].

Согласно проведенному нами анализу [8], основными типами почв (грунтов) на территории Витебской области являются: дерново-подзолистые, местами эродированные на моренных глинах и суглинках, которые составляют 50% от всех типов почв региона; дерново-подзолистые и глеевые преимущественно

на глинах (10,6%); дерново-подзолистые, местами эродированные, на лесах, лесоподобных суглинках и супесях (9,8%); дерново-подзолистые на песках (9%). Таким образом, перечисленные выше типы почв являются, слагаемыми техногенных ландшафтов на территории Витебской области.

Рассматривая фильтрационный процесс, происходящий при проливах нефти на почву (грунт), необходимо учитывать следующие свойства почв: пористость, влагоемкость, водопроницаемость, относительную влажность, растворимость. В лабораторных условиях была проведена оценка пористости некоторых из основных типов почв, характерных для потенциально-опасных с точки зрения нефтяного загрязнения районов Витебской области. Определялся коэффициент пористости  $m$  испытуемых почв (грунтов). Опыты проводились со светлыми нефтепродуктами различной плотности, для оценки использовалась расчетная формула

$$m = \frac{V_{\Pi}}{V} = \frac{V_{ж} - V_{ост}}{V}, \quad (7)$$

где  $m$  – коэффициент пористости;

$V_{\Pi}$  – объем, занятый пораами среды, м<sup>3</sup>;

$V$  – объем грунта, м<sup>3</sup>;

$V_{ж}$  – суммарный объем жидкости, используемый для фильтрации, м<sup>3</sup>;

$V_{ост}$  – остаточный объем жидкости после завершения фильтрации, м<sup>3</sup>.

В ходе проведенных исследований нами были получены опытным путем значения коэффициента пористости почв для рассматриваемых типов почв, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициент пористости почв

Тип почвы	Коэффициент пористости, доли
1. Легкий суглинок на границе с супесью	0,196
2. Перегнойно-глеевая, средний суглинок	0,473
3. Песок гравийно-хрящеватый	0,108
4. Дерново-подзолистая, легко суглинистая	0,157
5. Глина средняя, озерно-ледниковая (горизонт В)	0,087

По результатам проведенных исследований установлено, что вариации коэффициента пористости для исследуемых типов почв (грунтов) составляют от 0,087 до 0,473. На основании полученных опытным путем коэффициентов пористости для типов почв 1–5 (см. таблицу 1) были получены коэффициенты фильтрации для этих типов почв. Коэффициенты фильтрации, полученные нами ранее расчетным путем, включающим использование математической модели загрязнения различными нефтепродуктами [8], были уточнены. Однако следует заметить, что расхождение между опытным и расчетным значениями коэффициентов фильтрации находилось в пределах 25–50%, что для прогностических расчетов является допустимым. Для проведения прогностических расчетов загрязнения почв, позволяющих рассчитать площадь и глубину их загрязнения при авариях связанных с разливом нефтепродуктов, необходимо дополнительно задаваться расходом нефтепродукта (количество нефтепродукта на 1 м ширины нефтяного пятна) и его свойствами (плотностью и вязкостью).

**Заключение.** Для оценки численными методами масштабов и степени загрязнения почвы углеводородами используются различные математические модели, которые должны включать параметры, учитывающие свойства почв. Полученные результаты определения коэффициента пористости почв могут быть использованы как при проведении прогностической оценки возможных последствий нефтяного загрязнения почв, так и непосредственно учтены при ликвидации произошедших аварийных разливов нефти на естественных и техногенных ландшафтах.

При компьютерном моделировании техногенной нагрузки промышленных объектов на природную среду, в частности аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на почву, необходимо учитывать специфику типов и свойств почв районов пролива, а также устойчивость почв к различным воздействиям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тюленева, В.А. К вопросу исследования фильтрации нефти в почвах / В.А. Тюленева, В.А. Соляник, И.В. Васкина // Вісник КДПУ. – 2006. – № 2 (37) – С. 110–112.
2. Зильберман, М.В. Комплексная оценка воздействия нефтяного загрязнения почвы на экологическое состояние территорий / М.В. Зильберман, Е.А. Порошина, Е.В. Зырянова // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 11. – С. 42–43.

3. Методика оценки эколого-экономических последствий загрязнения земель нефтью и нефтепродуктами / В.К. Загвоздкин [и др.] // Проблемы анализа риска. – 2005. – Т. 2. – № 1. – С. 6–32.
4. Молокова, Н.В. Математическое моделирование процессов нефтезагрязнения пористой среды / Н.В. Молокова // Вестн. Сибир. гос. аэрокосмич. ун-та им. М.Ф. Решетнева. – 2010. – № 5. – С. 142–148.
5. Муратова, С.К. Оценка загрязнения нефтью, нефтепродуктами и разработка мероприятия по снижению их негативного воздействия на природную среду : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.36 / С.К. Муратова ; Казахский НТУ им. К.И. Сатпаева. – Алматы, 2010. – 22 с.
6. Шорина, Т.С. Влияние нефтяного загрязнения на биологическую активность черноземов оренбургской области / Т.С. Шорина // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. – 2009. – № 6. – С. 651–653.
7. Поташев, К.А. Модели и задачи теории фильтрации в слабых грунтах : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.05 / К.А. Поташев ; Казан. гос. ун-т. – Казань, 2007. – 19 с.
8. Савенок, В.Е. Определение нефтепроницаемости почв и грунтов / В.Е. Савенок, Е.В. Шаматульская // Весн. Віцеб. дзярж. ун-та. – 2014. – № 1 (79). – С. 44–49.

Поступила 15.04.2020

## ASSESSMENT OF HYDROCARBON SOIL CONTAMINATION BY NUMERICAL METHODS

*N. KOVALVSKAYA, V. SAVENOK, A. ZYAZULKIN*

*The existing numerical methods for assessing the pollution of soils of technogenic landscapes with oil products are analyzed, the coefficient of porosity of various soil types is determined empirically. With the help of this coefficient a predictive assessment of oil pollution of soils is made. The porosity coefficient values have been obtained empirically, which make it possible to determine the filtration coefficients for the soil types characteristic of the technogenic landscapes of the Vitebsk region. The obtained results of determining the coefficient of soil porosity can be used both in making a predictive assessment of the possible consequences of oil pollution of soils, and directly taken into account during the elimination of the occurred accidental oil spills on natural and technogenic landscapes.*

**Keywords:** *method, oil, assessment, soil, forecast, calculation.*

УДК 630\*907.1

**ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННОГО ГОДИЧНОГО ПРИРОСТА  
ДРЕВЕСИНЫ ХВОЙНЫХ ПОРОД В НАСАЖДЕНИЯХ НА СЕВЕРЕ БЕЛАРУСИ**

*канд. с.-х. наук, доц. А.А. БОЛБОТУНОВ, Е.В. ДЕГТЯРЕВА  
(Полоцкий государственный университет)  
e.degtjareva@psu.by, dendro.psu@gmail.com.by*

*Рассмотрены вопросы формирования ранней и поздней древесины в структуре годичного кольца лесообразующих пород. Приведены исследования хода роста деревьев хвойных пород на территории Беларуси. Показана возможность «выпадения» годичного кольца из-за отсутствия поздней древесины у деревьев сосны в автоморфных условиях в результате экстремальных климатических условий второй половины вегетационного периода. Приведен процент поздней древесины в ширине годичного кольца сосны в разных условиях местопроизрастания, а также ели и лиственницы. На основании восьмилетних наблюдений за ходом роста годичного кольца и корреляционно-регрессионного анализа были выявлены факторы, лимитирующие и продуцирующие радиальный прирост ранней и поздней древесины. Приведенные примеры моделирования дендрохронологических рядов ранней и поздней древесины сосны и ели выполнены на основе гармонического анализа Фурье. Среднесрочное прогнозирование для ранней и поздней древесины выполнено на пробной площади при совместном произрастании сосны и ели в Летчанском лесничестве Витебского лесхоза.*

**Ключевые слова:** *поздняя древесина, ранняя древесина, древесно-кольцевые хронологии, хвойные породы деревьев, дендрохронологические шкалы, Белорусское Поозерье.*

**Введение.** У хвойных и твердолиственных пород хорошо различима ранняя и поздняя древесина годичного кольца. Ранняя, или, как ее еще называют, весенняя древесина развивается в первой половине вегетационного периода и состоит из тонкостенной и широкополостной проводящей ткани. Вторая часть древесного годичного кольца – поздняя древесина развивается во второй половине вегетационного периода – летом и частично осенью, она состоит из толстостенных и узкополостных поздних элементов. Ранняя древесина хорошо приспособлена для транспорта воды по стволу дерева, тогда как поздняя обеспечивает стволу механическую прочность [1]. У хвойных средняя плотность поздней древесины часто в 2–3 раза выше, чем ранней [2]. Четкой границы между ранней и поздней древесиной не наблюдается, и переход ранней древесины в позднюю происходит постепенно. Многие исследователи отмечают существование так называемой «переходной зоны» между ранней и поздней древесиной. По данным основателя белорусской школы дендрохронологии В.Е. Вихрова, для лиственницы сибирской такая зона составляет 25% ширины годичного кольца [2].

У сосны годичный слой ранней древесины создается до конца июня, в июле и августе образуется поздняя древесина. Факторы, обуславливающие ход сезонного роста, будут варьировать в зависимости от древесной породы, погодных условий и условий местопроизрастания. Так, Т.Т. Битвинскас для территории Литвы полагает, что на прирост ранней древесины влияют метеорологические условия мая, отчасти июня, условия зимы и физиологическое состояние прошлых лет. На создание поздней древесины оказывают влияние метеоусловия июня, августа и физиологическое состояние дерева в начале лета [3]. В условиях Западной Сибири недостаток воды побуждает формирование поздней древесины, однако продолжительная засуха сокращает время, в течение которого продуцируются узкие и толстостенные клетки [4].

Ход сезонного радиального прироста дерева в толщину отражает общие закономерности роста отдельных пород в течение сезона и тесно связан с развитием листвы и хвои. На сезонный рост дерева, кроме условий внешней среды, влияют его возраст и различные фитоценоотические факторы. Господствующие деревья не только растут быстрее, но и имеют большую, чем угнетенные, продолжительность ростового сезона.

Цель наших исследований – изучить особенности хода сезонного радиального прироста хвойных пород в условиях Белорусского Поозерья, где хвойные породы в составе лесов занимают почти 50 %; определить процент поздней древесины в структуре годичного кольца в разных условиях местопроизрастания; выявить факторы, в большей мере определяющие величину прироста поздней и ранней древесины; выяснить особенности моделирования дендрохронологических рядов сезонной древесины в период потепления.

**Основная часть.** В условиях умеренного климата каждый год формируется одно годичное кольцо. В годы с экстремальными для роста деревьев условиями (засухи, весенние заморозки, объединение листьев насекомыми, интенсивные выбросы в атмосферу загрязняющих веществ и т.п.) во время вегетационного периода внутри годичного кольца могут сформироваться один или несколько слоев клеток поздней древесины – ложные годичные кольца [5]. В особо неблагоприятные для жизнедеятельности деревьев годы камбий может совсем не отложить новый слой древесины. Такие кольца называются «выпадающими». Это значительно затрудняет измерение и датировку годичных колец древесины.

В условиях Белорусского Поозерья выпадающие кольца у сосны обычно встречаются в условиях сильного переувлажнения в сфагновых, багульниковых типах леса. Но, как показали сложившиеся выраженные экстремальные ситуации по тепловлагообеспеченности в летний период 2015 г., отсутствие в древесном годовичном кольце поздней древесины возможно и в автоморфных условиях местопроизрастания на бедных песчаных почвах донных всхолмлений. За 2015 г. по данным Полоцкой гидрометеостанции продолжительность бездождевого периода в мае – июне составила 45 дней, в июле – августе – 56 дней, за вегетационный период выпало только 232 мм осадков при среднем количестве 360 мм. Это негативно сказалось на величине радиального прироста, в результате чего у части деревьев не сформировалась поздняя древесина в условиях А<sub>2</sub>.

Исследования в Воронежской государственной лесотехнической академии показали, что, хотя изменчивость значений ширины годовичного кольца поздней древесины с возрастом уменьшается, колебания между соседними годами достаточно велики [6]. Наши исследования, выполненные на основании результатов анализа изменчивости прироста сезонной древесины более 30 пробных площадей сосны, ели и лиственницы, для Белорусского Поозерья подтверждают этот факт только для сосновых насаждений. Действительно, для подавляющего большинства пробных площадей сосны коэффициент вариации дендрохронологического ряда динамики прироста поздней древесины выше, чем ранней (таблица). Это может означать, что для прироста ранней древесины во всех типах лесорастительных условий складывается более благоприятный комплекс климатических факторов, чем для прироста поздней зоны годовичного кольца. Для ели и для лиственницы ситуация не столь однозначна: в наиболее благоприятных для древесной породы условиях (примерно половина исследованных проб) коэффициент вариации ранней древесины больше, чем поздней.

Таблица. – Характеристики структуры годовичного кольца основных хвойных пород для севера Беларуси

Древесная порода, тип условий местопроизрастания	Средняя величина радиального прироста, мм			Коэффициент корреляции между поздней и ранней древесиной	Вариация индексов радиального прироста		
	поздняя	ранняя	общая		поздняя	ранняя	общая
сосна, А4-А5	0,3	0,5	0,8	0,80	25,9	25,6	24,1
сосна, В2-В3, С2	0,7	0,9	1,6	0,80	21,7	19,9	18,2
сосна, А2-В2	0,7	1,0	1,7	0,82	23,3	22,4	20,7
ель, В2-В3, С3	0,8	1,2	2,0	0,65	33,4	29,5	27,4
лиственница, С2-С3	1,1	1,5	2,6	0,78	23,1	25,7	22,7

У хвойных уменьшение ширины годовичного кольца с возрастом (или в связи с изменением экологических условий) происходит за счет ранней древесины, у лиственных – за счет поздней [6]. В результате у хвойных с возрастом процент поздней древесины возрастает и в благоприятных условиях может достигать 50%.

Существует мнение, что качество древесины сосны лучше в неблагоприятных условиях, когда формируются узкие годовичные кольца. Однако, как показывают исследования, на более богатых почвах количество поздней древесины по сравнению с ранней увеличивается, поэтому данное утверждение не совсем верно. В целом, доля ранней древесины сосны в общей ширине годовичного кольца наиболее значительная в период большого роста, постепенно снижается к 30–50 годам, после чего соотношение ранней и поздней древесины стабилизируется и составляет в хвойных лесах (возрастом 80–150 лет) северной части Беларуси для сосны около 40% в зависимости от древесной породы и условий местопроизрастания. В среднем, процент поздней древесины для хвойных пород показан на рисунке 1.

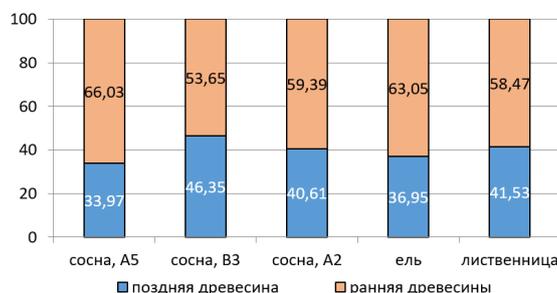


Рисунок 1. – Структура годовичного кольца основных хвойных пород

Рассматривая в дендрохронологических рядах отдельно раннюю и позднюю древесину, мы видим влияние тепловлагообеспеченности как в первой, так и во второй половине лета. У хвойных величина радиального прироста поздней древесины в значительной мере обусловлена физиологическим состоянием дерева к моменту начала формирования узких толстостенных клеток поздней древесины. Особенно хорошо это заметно у сосны (коэффициент корреляции между весенней и летней древесиной для нее составил

в среднем 0,81), в меньшей мере проявляется у ели и лиственницы (коэффициенты корреляции 0,65 и 0,78 соответственно). Значит, у хвойных пород формирование поздней части годичного кольца происходит под действием климатических условий всего вегетационного периода. Однако, как было замечено на некоторых пробных площадях, после 2005 г. наблюдается некоторая потеря сходства динамики сезонной древесины у сосны и ели, что может говорить об изменении климатических условий «внутри» вегетационного периода.

Как показывает корреляционно-регрессионный анализ, а также исследования хода роста, фактором, лимитирующим радиальный прирост (как поздний, так и ранний) являются высокие температуры июля и отсутствие осадков. Повышенные температуры мая и сентября оказывают благоприятное влияние. Исключением был 2019 г., когда прервалось формирование ранней древесины в мае-июне. Наличие достаточного количества осадков и сквозное промачивание почвы до грунтовой воды способствует увеличению прироста в автоморфных и полугидроморфных условиях местопрорастания.

Нашей лабораторией в течение уже восьми вегетационных периодов ведется мониторинг хода сезонного роста хвойных пород, выполняемый на модельных деревьях с помощью съемных датчиков часового типа [7]. Исследуется динамика радиального прироста 9 моделей сосны в разных условиях произрастания, 4 моделей ели и 3 моделей лиственницы. Наблюдения за радиальным приростом древесины и уровнем воды в скважинах выполняются каждые 5 дней.

Сроки начала и прекращения прироста варьируют в разные годы у разных пород и в различных условиях. За период потепления несколько изменились сроки пробуждения камбия и теперь на севере Беларуси у хвойных пород ход роста начинается в конце апреля – начале мая. В условиях Беларуси первой начинает прирост лиственница, она же может и пострадать от заморозков. Ель пробуждается позже всех, но и завершает прирост последней, иногда в середине сентября. В целом, прирост хвойных заканчивается в начале сентября, а в засушливые года (например, в 2015 году) – в середине или в конце августа. Усредненные значения прироста в процентах приводятся на рисунке 2.



Чтобы иметь возможность спрогнозировать дальнейшую динамику радиального прироста ранней и поздней древесины, выполняется моделирование дендрохронологических рядов. Математическое моделирование природных процессов состоит в подборе каким-либо методом аналитической функции, наиболее близкой к реальному процессу. Если используются численные методы, то подбирается числовой ряд, построенный по известным алгоритмам. Зная вид функции или алгоритм построения ряда, появляется возможность продления модельного ряда – экстраполяция или прогнозирование.

Для моделирования динамики изменения радиального прироста наилучшим образом подходят периодические функции (например, гармонический анализ Фурье) или функции и методы, имитирующие периодичность (такие как авторегрессия, спектрально-сингулярное разложение) [8]. Наиболее востребованным является среднесрочное прогнозирование (5–15 лет): на такие сроки разрабатываются стратегические планы, проектируются хозяйственные мероприятия. На рисунке 3 представлен график результатов моделирования гармонической функцией отдельно ранней и поздней древесины.



**Рисунок 3. – Моделирование радиального прироста сосны на пробной площадке № 108 в Витебском районе (Летцы, сосняк мшистый, А2)**

Согласно прогнозу, во второй половине 2020-х годов будут складываться оптимальные условия для прироста поздней древесины, а начало 2030-х для сосны в Витебском регионе в мшистом типе леса будет наименее благоприятными. Лимитирующими факторами в автоморфных условиях, как правило, являются холодные зимние условия или засушливые летние. Факторы региональной обусловленности экстремальных проявлений климатических условий рассматриваются в работах С.А. Лысенко [9].

**Закключение.** Дендрохронологический анализ с учетом сезонной структуры годичного кольца предоставляет более широкие возможности в оценке устойчивости и продуктивности хвойных фитоценозов и состояния окружающей среды. Проводимый мониторинг за ходом формирования годичного кольца и изучение влияния климатических и других условий позволяет выявить лимитирующие и продуцирующие радиальный прирост факторы как для ранней, так и для поздней древесины.

«Выпадение годичного кольца» при чтении кернов древесных пород замечено не только в гидроморфных, но и в автоморфных условиях местопроизрастания при засушливых условиях второй половины вегетационного периода во время формирования поздней древесины. Выявлены факторы снижения прироста ранней древесины при высокой температуре в условиях отсутствия осадков в мае – июне. Процент поздней древесины в составе годичного кольца зависит как от древесной породы, так и от условий местопроизрастания. В более благоприятных условиях поздней древесины образуется больше.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Румянцев, Д.Е. Биологические основы изменчивости годичных колец / Д.Е. Румянцев, А.А. Епишков // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–3. – С. 481–486.
2. Вихров, В.Е. Некоторые принципы дендроклиматологии / В.Е. Вихров, Б.А. Колчин // Вопросы лесного хозяйства, лесной и химической промышленности. – Минск : Высш. шк., 1967. – С. 22–37.
3. Битвинская, Т.Т. Дендроклиматические исследования / Т.Т. Битвинская. – Л. : Гидрометеоздат, 1974. – 170 с.
4. Ваганов, Е.А. Анализ роста дерева по структуре годичных колец / Е.А. Ваганов, И.А. Терсков. – Новосибирск : Наука, 1977. – 94 с.
5. Шиятов, С.Г. Дендрохронология, ее принципы и методы / С.Г. Шиятов // Записки Свердловского отделения Всесоюз. ботанич. общества. – Свердловск, 1973. – Вып. 6. – С. 53–81.
6. Матвеев, С.М. Дендрохронология : учеб. пособ. / С.М. Матвеев, Д.Е. Румянцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Воронеж, 2013. – 140 с.
7. Устройство для измерения радиального прироста хвойных пород деревьев : пат. ВУ № 10012 / А.А. Болботунов, С.В. Лесковец. – Опубл. 16.12.2013.
8. Дегтярева, Е.В. Моделирование дендрохронологических данных на основе анализа Фурье / Е.В. Дегтярева, А.А. Болботунов, А.М. Дегтярев // Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ–2018) : материалы I Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та, 14–15 июня 2018 г. – Новополоцк, 2018. – С. 122–124.
9. Лысенко, С.А. Сеточный архив метеорологических данных Республики Беларусь и возможности его применения для исследования пространственно-временных особенностей изменения климата / С.А. Лысенко, В.Д. Чернышев, В.В. Коляда // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 17–27.

Поступила 10.09.2020

#### FEATURES OF THE SEASONAL ANNUAL INCREMENT OF CONIFERS WOOD IN FORESTS IN THE NORTH OF BELARUS

*A. BOLBOTUNOV, E. DEGTJAREVA*

*The article deals with the formation of early and late wood in the structure of the annual ring of forest-forming species. The studies of the growth of coniferous trees in Belarus are given. The possibility of "falling out" of the annual ring due to the absence of a late tree in *Pinus silvestris* on high landforms as a result of the extreme climatic conditions of the second half of the growing season is shown. The percentage of latewood in the structure of the tree ring of spruce, larch and pine in different growth conditions was calculated. On the basis of seven-year observations of the growth of the annual tree ring and of the correlation-regression analysis, factors limiting and producing a radial increase in early and late wood were identified. Examples of modeling dendrochronological scales of early and late pine and spruce based on the harmonic analysis of Fourier, as well as the use of autoregression are given. Medium-term forecasting of early and late wood was carried out on trial plots with the joint growth of pine and spruce in the Vitebsk region.*

**Keywords:** late wood, early wood, tree-ring chronologies, coniferous tree species, dendrochronological scales, Belarusian Land O'lakes.

УДК 66.021.3

**ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ НАСАДОК  
МАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

**Д.Ю. МЫТЬКО, д-р техн. наук, проф. П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ**  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Дана краткая характеристика экологической проблемы, связанной с загрязнением окружающей природной среды, и предложен один из путей ее решения. Приведено описание процесса использования регулярных насадочных элементов для процесса абсорбции и указаны их преимущества. Представлены четыре вида регулярных насадок для проведения эксперимента, а также предложена методика расчета гидравлического сопротивления в зависимости от средней скорости газового потока в аппарате сухих и орошаемых насадочных тел. Приведены графики зависимостей гидравлического сопротивления от скорости газа, полученные методом расчета сухих и орошаемых насадок, и экспериментальных данных. Выполнен анализ взаимодействия фаз и отражены режимы движения пленки жидкости относительно увеличения скорости газа. Выбрано перспективное направление для дальнейшего развития исследований.

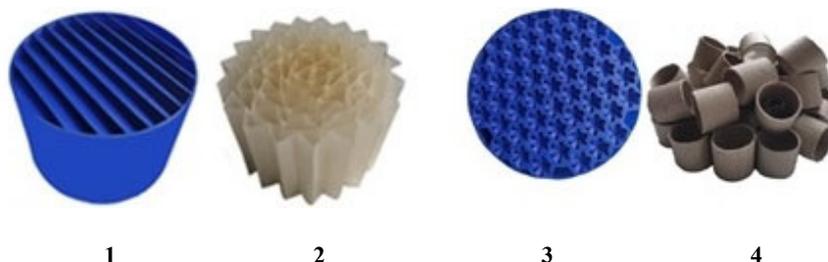
**Ключевые слова:** регулярная насадка, гидравлическое сопротивление, абсорбция, критерий Рейнольдса, инверсия фаз.

**Введение.** С каждым годом содержание в воздухе оксида углерода, диоксида серы, диоксида азота, оксида азота и бензола неуклонно повышается, что актуализирует вопросы, связанные с очисткой отходящих газов после технологического оборудования. Эту проблему можно решить установкой абсорбционной колонны с регулярной структурированной насадкой. Данная насадка позволит увеличить время контакта фаз и повысить эффективность очистки газа [1].

Структурированные насадки обычно выполняются в виде набора отдельных гофрированных листов, собранных в пакеты (блоки), предназначенные для принудительного перемещения жидкостей по определенным траекториям. Сами листы могут быть изготовлены из полимерных, керамических и других материалов. Образующиеся при этом каналы имеют сложную пространственную конфигурацию. Кроме того, структурированные листовые насадки позволяют избежать байпасирования контактирующих потоков из-за присущих насыпным нерегулярным слоям (например, кольцам Рашига) явлений пристенной анизотропии [2].

Регулярная упаковка с упорядоченными каналами обычно предпочтительна для улавливания углеродистых газов, поскольку она обеспечивает более эффективную площадь межфазного контакта между газовой и жидкой фазами [3]. Для данного типа насадок характерен низкий перепад давления, хорошая эффективность массопереноса и высокая производительность. Важными свойствами оптимальной упаковки, являются высокая эффективная площадь, равномерное распределение жидкости, хорошее смешивание фаз, низкий перепад давления и структура, состоящая из материала небольшой толщины [4].

**Основная часть.** Для проведения экспериментального исследования были выбраны три регулярные структурированные насадки (рисунок 1): волнообразная, сотообразная с завихрителями, зигзагообразная и одна неструктурированная – неупорядоченно уложенные кольца Рашига.



1 – волнообразная; 2 – зигзагообразная; 3 – сотообразная; 4 – кольца Рашига

Рисунок 1. – Насадки для массообменных аппаратов

Исследования проводились на лабораторной абсорбционной установке с внутренним диаметром массообменного аппарата  $D_{\text{вн}} = 0,142$  м на системе воздух-вода. Расход воздуха замерялся через диафрагму, связанную с дифманометром. Перепад давления измерялся дифманометром. Для эксперимента были выбраны три плотности орошения  $q$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ : 0,003; 0,0036; 0,0043.

Гидравлическое сопротивление сухой насадки  $\Delta P_{\text{сух}}$ , Па/м, рассчитывают следующим образом [5–8]:

$$\Delta P_{\text{сух}} = \frac{H \cdot \xi_0 \cdot w^2 \cdot \rho_r \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3}, \quad (1)$$

где  $H$  – высота насадки, м;  
 $\xi_0$  – эффективный коэффициент трения;  
 $w$  – средняя скорость газа в колонне, м/с;  
 $\rho_r$  – плотность газовой смеси при рабочих условиях, кг/м<sup>3</sup>;  
 $a$  – удельная поверхность насадки м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  
 $\varepsilon$  – удельный свободный объем насадки, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

Для регулярных насадок эффективный коэффициент трения определяется по формуле

$$\xi_0 = \xi_{\text{тр}} + \zeta \cdot \frac{d_{\text{экв}}}{l}, \quad (2)$$

где  $\xi_{\text{тр}}$  – коэффициент сопротивления трения, равный 0,053 в автомодельном режиме;  
 $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления;  
 $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр насадки;  
 $l$  – высота элемента насадки.

Коэффициент местного сопротивления для регулярных насадок

$$\zeta = \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (b - c \cdot \varepsilon) = \frac{b}{\varepsilon^2} - \frac{b + c}{\varepsilon} + c, \quad (3)$$

где  $b = 4,2$  и  $c = 3,9$  – коэффициенты, принятые для блочной насадки.

Критерий Рейнольдса для газа рассчитывают по действительной скорости газа и эквивалентному диаметру насадки:

$$\text{Re}_r = \frac{w_d \cdot d_{\text{экв}}}{\nu_r}, \quad (4)$$

где  $w_d$  – действительная скорость газа, м/с;  
 $\nu_r$  – кинематическая вязкость газа, м<sup>2</sup>/с.

Действительная скорость газа определяется по формуле

$$w_d = \frac{w}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Эффективный коэффициент трения для колец:

– при ламинарном режиме ( $\text{Re}_r < 40$ )

$$\xi_0 = \frac{140}{\text{Re}_r}; \quad (6)$$

– при турбулентном режиме ( $\text{Re}_r > 40$ )

$$\xi_0 = \frac{16}{\text{Re}_r^{0,2}}. \quad (7)$$

Удельная поверхность насадки определяется из формулы

$$a = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{\Phi \cdot d_0}, \quad (8)$$

где  $\Phi$  – коэффициент формы;

$d_0$  – диаметр эквивалентного шара, м:

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_1}{\pi}}, \quad (9)$$

где  $V_1$  – объем насадочного тела.

Удельный свободный объем насадки вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \frac{n \cdot V_{н.т.}}{V_n}, \quad (10)$$

где  $n$  – количество насадочных тел;

$V_{н.т.}$  – объем насадочного тела, м<sup>3</sup>;

$V_n$  – объем насадки, м<sup>3</sup>.

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки можно определить из выражения [9–10]

$$\Delta P = \Delta P_{\text{сух}} \left[ 1 + B \cdot \left( \frac{L}{G} \right)^n \cdot \left( \frac{\rho_r}{\rho_{\text{ж}}} \right)^m \cdot \left( \frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_r} \right)^c \right], \quad (11)$$

где  $B, n, m, c$  – постоянные для системы газ-жидкость;

$L$  – расход абсорбента, м<sup>3</sup>/с;

$G$  – расход газовой смеси, м<sup>3</sup>/с;

$\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_{\text{ж}}$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$\mu_r$  – динамическая вязкость газа, Па·с.

В формуле (11) выполнен переход от плотности орошаемой жидкости и средней скорости газового потока в сечении аппарата к общему объемному расходу абсорбента и газа. Данный перевод выполнен для более точного определения гидравлического сопротивления орошаемой насадки.

Основные параметры насадок, рассчитанные по формулам (1–11), представлены в таблице.

Таблица. – Характеристики насадок

Параметры	Насадки			
	Волнообразная	Зигзагообразная	Сотообразная	Кольца Рашига
$w_d$	1,758	1,877	8,988	1,720
$\varepsilon, \text{м}^3/\text{м}^3$	0,864	0,809	0,771	0,883
$a, \text{м}^2/\text{м}^3$	256,44	394,491	369,94	241,152
$d_0, \text{м}$	0,074	0,083	0,088	0,071

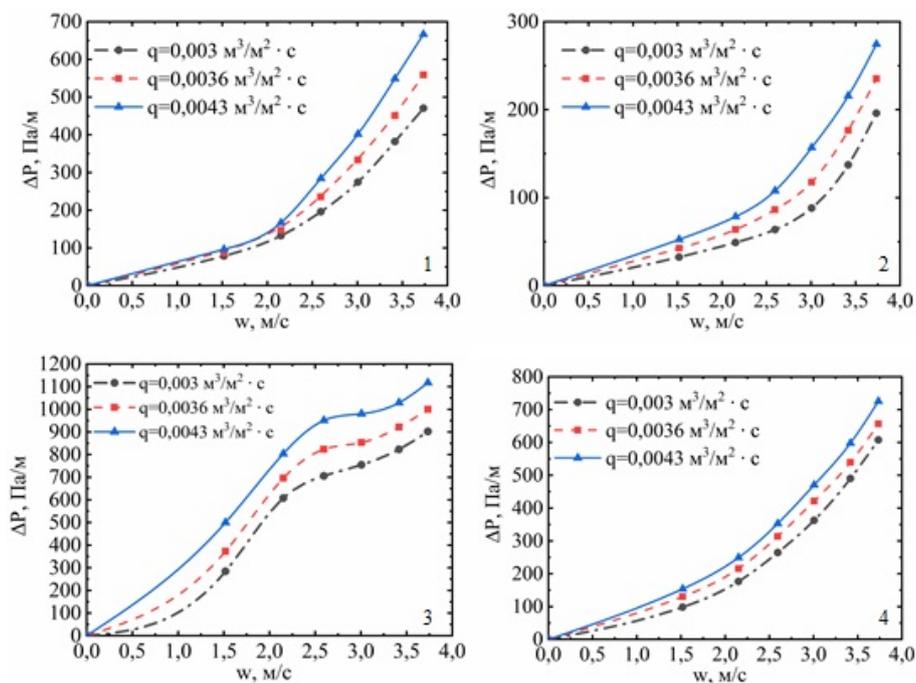
Действительная скорость газа в канале сотообразной насадки высока. Это связано с небольшим значением площади живого сечения. Зигзагообразная насадка обладает наивысшей удельной поверхностью по сравнению с другими насадочными телами. Высокий показатель  $a, \text{м}^2/\text{м}^3$ , позволяет увеличить контакт между жидкой и газообразной фазой тем самым повысить эффективность массопередачи. Пропускная способность колец Рашига является достаточно хорошей из-за наибольшего свободного объема среди исследуемых насадочных тел. Это дает преимущество в снижении гидравлического сопротивления. Для более точного расчета удельной поверхности важным параметром является диаметр эквивалентного шара. Его увеличение приводит к уменьшению площади тела, занимаемого в единице объема.

На рисунках 2, а и 3 изображены графические зависимости гидравлического сопротивления от скорости газа в колонне, полученные расчетным путем. На рисунке 2, б – экспериментальные данные.

По рисункам 2, а и 2, б видно, что гидравлическое сопротивление сотообразной насадки является самым высоким, что связано с небольшим живым сечением насадки, а также с тем, что на входе и выходе каналов установлены завихрители, меняющие направление движения воздуха. В результате образуются вихри, которые двигаются тангенциально по отношению к поперечному сечению канала.



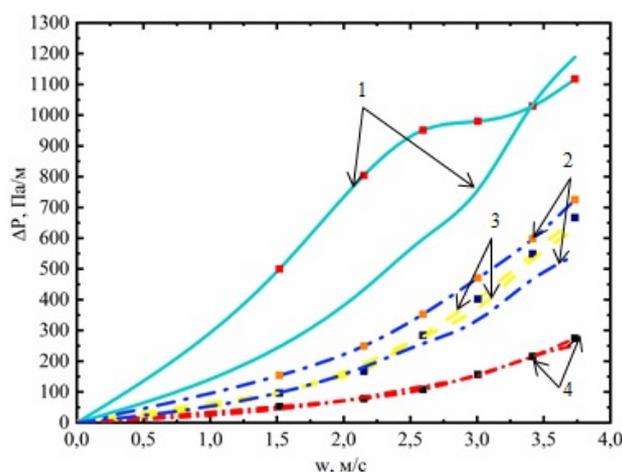
При скоростях от 2,5 м/с до 3,0 м/с наблюдается унос жидкости из аппарата.



1 – зигзагообразная насадка; 2 – кольца Рашига;  
3 – волнообразная насадка; 4 – сотовая насадка

Рисунок 4. – Зависимость гидравлического сопротивления  $\Delta P$ , Па/м, от средней скорости газа  $w$ , м/с, в колонне при разных плотностях орошения  $q$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , насадок

Сравнение гидравлического сопротивления орошаемых насадок при максимальной плотности орошения  $q = 0,0043$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , полученного экспериментальным путем (линии с указанными точками) и рассчитанного по формулам (1)–(11) (сплошные линии без точек) представлено на рисунке 5.



1 – сотовая насадка; 2 – кольца Рашига;  
3 – волнообразная насадка; 4 – зигзагообразная насадка

Рисунок 5. – Сравнительная зависимость экспериментального и рассчитанного гидравлического сопротивления  $\Delta P$ , Па/м от средней скорости газа  $w$ , м/с в колонне при максимальной плотности орошения  $q = 0,0043$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  насадок

Видно, что расхождение экспериментальных и расчетных значений сотовой насадки существенны. Оно достигает до 37,9%. Эта разница является достаточно высокой. Такой процент можно аргументировать скоплением большого количества жидкости над завихрителями насадки. Эта конструктивная

особенность не учтена в рассмотренной ранее методике расчета. Достаточно большое (до 25%) несовпадение расчетных и экспериментальных значений гидравлического сопротивления наблюдается и для колец Рашига. Этот факт можно также объяснить несовершенством методики расчета, которая, в основном, ориентирована на регулярную насадку. Последнее подтверждается хорошей сходимостью (отклонение не превышает 8%) для регулярной волно- и зигзагообразной насадок.

**Заключение.** В результате изучения гидродинамических характеристик установлено, что гидравлическое сопротивление волно- и зигзагообразной насадок сопоставимо и даже ниже, чем у колец Рашига. Более высокое его значение для сотообразной насадки свидетельствует о необходимости ее конструктивного совершенствования. В итоге нужно отметить, что из всех четырех насадок самым низким гидравлическим сопротивлением обладает зигзагообразная насадка. Она является перспективным вариантом для дальнейшей оптимизации с целью интенсификации технологических процессов, а именно: формирование режимов с регулярными гидродинамическими структурами при течении тонких слоев жидкости в условиях волнообразования, создания искусственной шероховатости поверхности насадок с определенным соотношением ее геометрических характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мамбетова, М.Ж. Очистка и сорбция токсичных газов / М.Ж. Мамбетова [и др.] // Химический журнал Казахстана. – 2016. – № 3. – С. 162–173.
2. Пушнов, А. Аэродинамика керамических регулярных насадок для тепломассообменных процессов в аппаратах защиты окружающей среды / А. Пушнов, А. Сакалаускас // Journal of environmental engineering and landscape management. – 2008. – № 16(1). – С. 30–37.
3. Miramontes, E. Additively Manufactured Packed Bed Device for Process Intensification of CO<sub>2</sub> Absorption and Other Chemical Processes / E. Miramontes [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2020. – С. 1–38.
4. Jokar, S.M. Simulation and feasibility analysis of structured packing replacement in absorption column of natural gas dehydration process: A case study for Farashband gas processing plant, Iran / S.M. Jokar [et al.] // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2014. – С. 317–350.
5. Рамм, В.М. Абсорбция газов. / В.М. Рамм. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Химия, 1976. – 656 с.
6. Малков, М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Малков [и др.]. ; под. ред. М.П. Малкова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
7. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик ; под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.
8. Флореа, О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии. / О. Флореа, О. Смигельский.– М. : Химия, 1971. – 448 с.
9. Никольский, Б.П. Справочник химика : в 5 т. / Б.П. Никольский, О.Н. Григоров, М.Е. Позин. – М. : Химия, Ленинское отделение, 1968. – 976 с.
10. Гельперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии : в 2-х кн. / Н.И. Гельперин. – М. : Химия, 1981. – 812 с.

Поступила 09.07.2020

#### HYDRAULIC RESISTANCE OF REGULAR ATTACHMENTS OF MASS EXCHANGE DEVICES

*P. VAJTEHOVICH, D. MYTSKO*

*A brief description of the environmental problem associated with environmental pollution is given, and one of the ways to solve it is proposed. The process of using regular packing elements for the absorption process is described and their advantages are indicated. Four types of regular nozzles for the experiment are presented, and a method for calculating the hydraulic resistance depending on the average gas flow rate in the apparatus of dry and irrigated nozzle bodies is proposed. Graphs of the dependence of hydraulic resistance on gas velocity obtained by calculating dry and irrigated nozzles and experimental data are presented. The analysis of the interaction of phases is performed and the modes of motion of the liquid film relative to the increase in the gas velocity are reflected. A promising direction for further development of research has been chosen.*

**Keywords:** regular nozzle, hydraulic resistance, absorption, Reynolds criterion, phase inversion.

## СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 620.1.08

### КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ВИДЕОМОНИТОРИНГА ИСПЫТАНИЙ ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

канд. техн. наук, доц. Р.П. БОГУШ, канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ,  
А.Н. ЯГУБКИН, Е.А. СКРИПЕЛЕВ  
(Полоцкий государственный университет)

*В статье предложена архитектура системы видеомониторинга состояния и происходящих физических процессов в строительном материале или конструкции в процессе нагрузочных испытаний. Она основана на использовании видеокamer и алгоритма обработки последовательностей изображений для считывания, распознавания и записи в персональный компьютер показаний цифровых приборов в реальном времени. Разработан алгоритм обработки видеоданных, который включает покaдровый захват видеопотоков, сегментацию области цифрового табло, улучшение качества изображения выделенной области, распознавание цифровых данных, постобработку полученных значений. Результаты отображаются в онлайн-режиме на экране монитора и могут быть сохранены в файл, что дает возможность их дальнейшего их анализа. Предлагаемая система апробирована в испытательно-исследовательском центре Полоцкого государственного университета и является перспективной при проведении испытаний элементов строительных конструкций с применением цифровых измерительных приборов.*

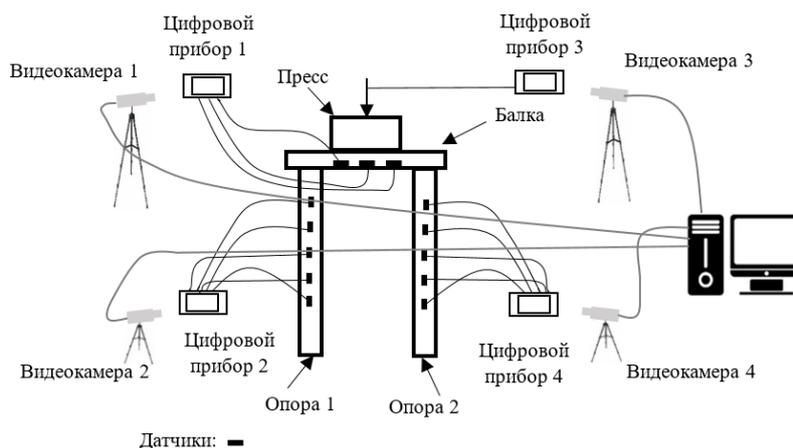
**Ключевые слова:** испытание материалов и конструкций, видеомониторинг, обработка изображений, компьютерная система.

**Введение.** Современные методы выходного контроля строительных материалов, изделий, конструкций, а также методы детального обследования технического состояния эксплуатируемых зданий и сооружений требуют проведения натурных испытаний на специальных стендах с применением измерительных приборов. В случае невозможности транспортировки объекта испытаний в лабораторию испытания проводятся в полевых условиях на объекте. В Полоцком государственном университете действует аккредитованный Испытательно-исследовательский центр. Актуальной проблемой для подобного рода испытаний является отсутствие готового решения для комплексного анализа всего спектра получаемых данных с цифровых приборов при проведении исследований. В течение последних лет проводятся работы по созданию различного рода систем мониторинга за состоянием зданий и сооружений, использующих внедрение во время возведения конструкции датчиков, передающих информацию по различным каналам связи [1; 2]. В повседневной практике рынка строительных услуг Беларуси приходится сталкиваться с производством и обследованиями конструкций, лишенных подобных систем мониторинга.

Для создания строительных материалов с заданными свойствами необходимо исследовать их поведение под нагрузкой, приводящей к разрушению конструкции, а также в процессе роста нагрузки. Сложные взаимосвязи напряжений и деформаций в строительных материалах требуют их изучения во времени как при динамических, так и при статических нагрузках [3–7]. Современное оборудование позволяет проводить подобные исследования, однако в большинстве организаций (научных, образовательных, производственных) испытательное оборудование, выводя на экран информацию по нагрузке и деформации, сохраняет только значение, соответствующее окончанию испытания (предел прочности, предел допустимых деформаций и т.п.). Особую важность разработка систем мониторинга поведения материалов под нагрузкой приобретает в рамках проводимых авторами исследований, связанных с компьютерным моделированием нелинейного поведения строительных конструкций. Учет физически и геометрически нелинейных эффектов приводит к изменению изгибной и продольной жесткости элементов и существенному перераспределению усилий в статически-неопределимых конструкциях. Наличие систем мониторинга позволяет уточнять и верифицировать нелинейные математические модели поведения строительных элементов, используемые для выработки оптимальных конструктивных решений, поэтому актуальной является разработка системы получения и сохранения динамических данных с приборов, что позволит оценить результаты практически для любого момента времени в период эксперимента, в том числе и после его завершения.

**Общая характеристика системы.** Комплексная система видеомониторинга испытаний прочности и деформативности строительных материалов и конструкций, состоящая из пространственно-разнесенных USB- или IP-камер, которые устанавливаются для считывания показаний цифровых измерительных приборов, организована на основе единого центра обработки данных – персонального компьютера. Применение

видеокамеры для захвата изображений приборов и распознавание их показаний в реальном времени с возможностью графического отображения получаемых результатов, сохранения всех данных на компьютере позволит значительно расширить возможности анализа, обработки и принятия правильных решений при проведении исследований. При этом для обеспечения универсальности использования программного продукта следует учитывать необходимость применения нескольких цифровых приборов, разнообразие информационных табло, размещение нескольких приборов в кадре. Подобная задача возникает при проведении комплексных испытаний прочности и деформативности опор и балок. Структура организации системы мониторинга в этом случае показана на рисунке 1. В соответствии с заданной методикой испытаний на элементах конструкции закрепляют необходимый набор датчиков, которые подключены к цифровому прибору. При наличии трех элементов возможно использование более чем одного цифрового прибора (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Пример использования системы видеомониторинга испытаний прочности и деформативности строительных материалов и конструкций**

Для распознавания показаний цифровых измерительных приборов на видеопоследовательности и представления данных предлагаемая система использует персональный компьютер, поэтому метод обработки видеоданных должен минимизировать требуемые вычислительные затраты. С учетом этого построен алгоритм обработки, который состоит из следующих основных шагов: пок кадровое считывание видеопотоков; сегментация анализируемой области или областей цифрового табло; улучшение качества изображения выделенных областей; распознавание цифровых данных на каждом кадре; постобработка полученных значений для уменьшения вероятности влияния ошибок распознавания; сохранение данных в файл; представление обработанных данных в графическом или табличном виде.

**Обработка видеоданных.** Одной из основных задач в разрабатываемой системе является распознавание цифровых данных на последовательностях изображений с высокой точностью и с удовлетворительными вычислительными затратами. С учетом того, что предъявляются требования к обеспечению высокого быстродействия на персональном компьютере, обработке различных изображений цифровых табло измерительных приборов, возможности анализа нескольких цифровых групп с данными в кадре, выделение областей целесообразно предоставить оператору. Это связано в том, что применение алгоритма автоматической сегментации, удовлетворяющего такому спектру задач, значительно увеличит временные затраты. Кроме того, для анализа не всегда требуется использовать данные всех групп, которые отображаются на табло, соответственно, участие оператора было бы необходимо в ряде случаев и при автоматической сегментации.

Оптическое распознавание символов (optical character recognition, OCR) позволяет переводить их изображения в данные, используемые для представления символов в компьютере. В настоящее время существует ряд реализаций OCR в виде библиотек компьютерных программ, которые могут быть свободно применены при разработке прикладного программного обеспечения. В настоящее время система Tesseract [8] характеризуется высоким качеством распознавания и быстродействием, что позволит обрабатывать видеопотоки с камер на персональном компьютере в реальном времени, является свободной компьютерной библиотекой для распознавания текстовых символов и может быть использована при разработке программных средств на многих языках программирования. В таблице 1 приведены вероятности правильного распознавания текстовых символов ( $P$ ) библиотекой Tesseract для различных типов входных изображений [8].

Анализ таблицы показывает, что вероятность правильного распознавания текста зависит от качества исходного изображения, поэтому на первом шаге улучшения качества изображения осуществляется повышение контраста методом нормализации гистограммы. Данный метод обеспечивает растяжку не всего диапазона изменения интенсивностей, а только его наиболее информативного участка, что усиливает эффект контрастности за счет потери шумовых областей с редко встречающимися интенсивностями.

Таблица 1. – Результаты работы Tesseract с различными типами входных изображений

Качество входного изображения	$P, \%$
200 точек на дюйм, без шума и искажений символов	100
72 точки на дюйм, черно-белое, без шума и искажений символов	97
72 точки на дюйм с незначительным линейным искажением	97
72 точки на дюйм, незначительные линейные искажения и перекося 2 градуса	96

При таком подходе выходной уровень яркости  $g_{x,y}$  для пикселя определяется следующим образом:

$$g_{x,y} = 255 \cdot \frac{(f_{x,y} - f_{\min})}{(f_{\max} - f_{\min})},$$

где  $f_{x,y}$  – уровень яркости входного пикселя с координатами  $x, y$ ;

$f_{\min}$  и  $f_{\max}$  – заданные минимальное и максимальное значения уровней пикселей входного изображения соответственно.

Для устранения шума используется фильтр Гаусса, который использует нормальное распределение для вычисления преобразования, применяемого к каждому пикселю изображения. Благодаря этому можно уменьшить с расстоянием влияние соседних пикселей на анализируемый. Ядро фильтра Гаусса определяется как [9]

$$h_{x,y} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}},$$

где  $\sigma$  – радиус фильтра.

На следующем шаге используется метод бинаризации изображений с адаптивным порогом, который обеспечивает робастность к изменениям яркостных характеристик области. На рисунке 2 показан пример применения указанных операций к изображению табло с цифровыми данными.



$a$  – исходное изображение;  $b$  – изображение после фильтрации и адаптивной бинаризации

Рисунок 2. – Пример применения предварительной обработки к видеоданным

Постобработка использует заданное оператором допустимое максимальное изменение контролируемого параметра для сопоставления полученного значения с предыдущими данными и позволяет уменьшить вероятность ошибки при неправильном распознавании.

**Результаты экспериментов.** Эксперименты с использованием разработанной системы выполнялись при испытании арболитовых образцов с помощью пресса гидравлического малогабаритного ПМГ-1000МГ4, который используется для давления на образец материала (рисунок 3).



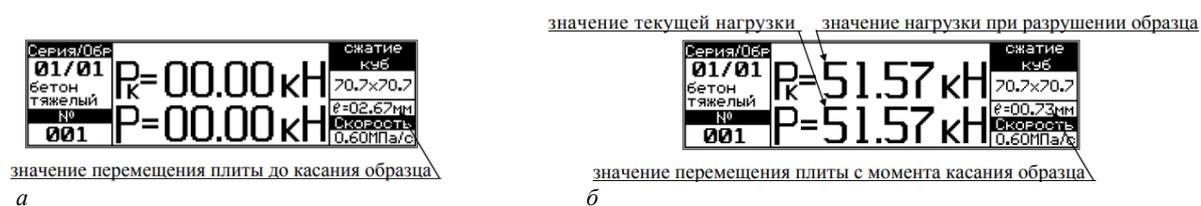
Рисунок 3. – Проверка прочности арболитового образца

Технология испытания по определению прочности на сжатие состоит в следующем:

1) испытуемый образец устанавливается строго по оси верхней и нижней плит. Зазор между верхней плитой и образцом, устанавливаемый силовым винтом пресса, должен составлять от 3 до 4 мм.

2) нагружение образца производится со скоростью, установленной оператором (например, 0,6 МПа/с), либо со скоростью, устанавливаемой автоматически (в соответствии с требованиями ГОСТ на метод испытаний). На первом этапе, когда между образцом и верхней плитой пресса есть зазор (см. п. 1), датчик перемещения нижней плиты пресса в правом поле дисплея (буква «e», мм) отображает значение перемещения (мм) нижней опорной плиты пресса (рисунок 4, а). На втором этапе, после соприкосновения образца с верхней опорной плитой, значение датчика перемещения нижней опорной плиты пресса обнуляется. Таким образом, на втором этапе мы получаем показания деформации образца (буква «e», мм) (рисунок 4, б).

В процессе испытания на табло цифрового прибора ПМГ-1000МГ4 отображаются максимальная нагрузка (кН), текущая нагрузка (кН) и перемещение плиты после начала нагружения или деформация образца (мм) (рисунок 4, б).



а – в начале испытаний; б – в процессе проведения испытаний

Рисунок 4. – Информация на цифровом табло

При использовании метода ввода данных, представленного на рисунке 1, источником видеопотока является подключенная камера или ранее записанный видеофайл. Для ускорения обработки, если это допускается методикой эксперимента, интервал считывания кадров может варьировать, поэтому предусмотрена настройка данного параметра перед началом обработки видеопотока. В целом, разработанное программное обеспечение, основное окно интерфейса которого показано на рисунке 5, а, предоставляет следующие основные возможности:

- настройки для каждого видеопотока, такие как выбор источника (видеокамера или видеофайл), локализация пользователем областей информационных табло в кадре, выбор алгоритмов предварительной обработки (рисунок 5, б), выбор типа текстового файла для вывода данных, задание начального отсчета времени для считывания первого кадра видеопотока и временного интервала между обрабатываемыми кадрами;
- одновременная обработка до пяти видеопоследовательностей;
- включение режима «пауза» для возможности предварительного анализа получаемых данных;
- графическое представление обработанных данных онлайн с возможностью его масштабирования (рисунок 5, в), а также сохранение статического графика для заданного момента времени;
- масштабирование открытого графика в режиме реального времени;
- запись данных в текстовый файл.

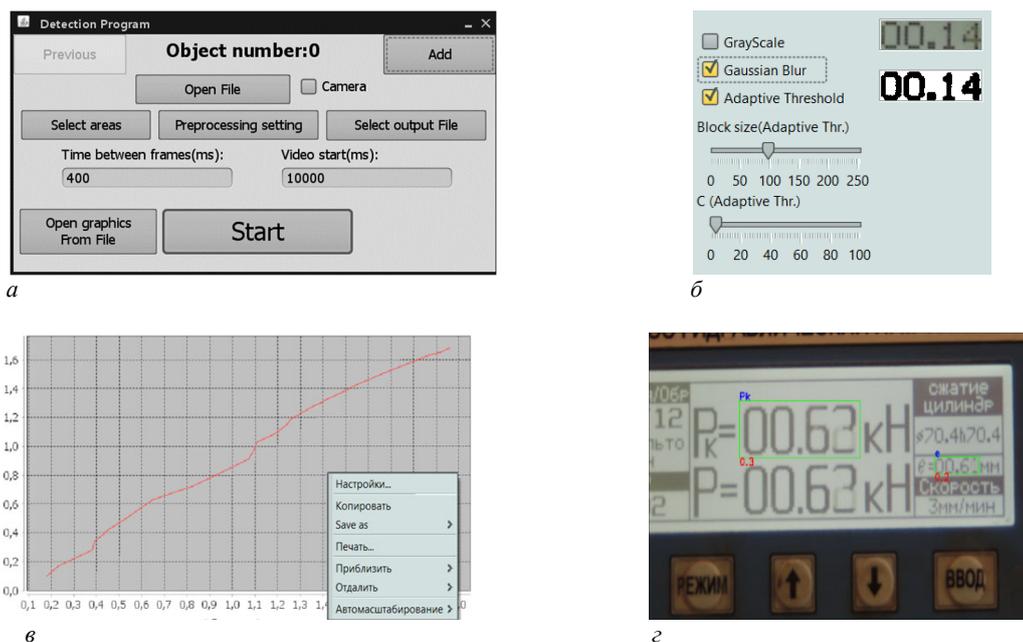
Данное программное обеспечение разработано на языке Java с использованием библиотек OpenCV, Tesseract, JFreeChart и Swing.

Обработка нескольких видеопотоков выполняется параллельно и реализована с использованием многопоточности. Для каждой выделенной области цифрового табло создается поток TesseractThread, в который передается изображение области, после окончания работы всех потоков данные передаются в реализованный класс VideoCaptureThread, в котором выполняется обработка и сохранение результатов. Оценка времени обработки для различного количества выделенных областей представлена в таблице 2 с использованием персонального компьютера с основными характеристиками CPU IntelCore i5-4460 3,2GHz, ОЗУ 8Гб.

Таблица 2. – Временные затраты при обработке различного числа областей с данными

Количество областей обработки	Время обработки, мс
1	417
2	428
3	480
4	570
5	660

На рисунке 5, г показан пример информационного окна после выбора области с данными. В верхней левой части над областью отображается имя данной области, а под областью выводится заданное допустимое максимальное изменения контролируемого параметра, которое используются для постобработки полученных данных.



**а** – окно настройки предобработки; **б** – окно настройки параметров предварительной обработки;  
**в** – результат обработки в графическом виде; **г** – отображение параметров для сегментируемых областей

**Рисунок 5. – Интерфейс разработанного программного обеспечения**

На рисунке 6 приведено фото системы при подготовке к оценке прочности арболитового образца в испытательно-исследовательском центре Полоцкого государственного университета.



**Рисунок 6. – Установка камеры для считывания информации с дисплея гидравлического пресса**

Выполненные эксперименты по оценке прочности арболитового образца в испытательно-исследовательском центре Полоцкого государственного университета с использованием разработанной системы позволили оценить его свойства не только при разрушении (разрушающая нагрузка, предельная деформация), но и на протяжении всего испытания с построением графика зависимости «нагрузка – деформация» в реальном времени. Это позволило без дорогостоящего оборудования изучать механизм поведения материалов и конструкций под нагрузкой как для производственных, так и для научных целей.

**Закключение.** Предложено использовать считывание данных с цифровых приборов на основе обработки видеопоследовательностей, формируемых камерами наблюдения за их информационными табло при проведении испытаний прочности и деформативности строительных материалов и конструкций. При этом в качестве входных данных может использоваться последовательность изображений, получаемая с видеокamеры в реальном времени или видеofайл, хранимый на носителе информации. В программном

обеспечении реализованы основные функции: выбор областей в кадре для распознавания данных; настройка предобработки последовательностей изображений для каждой выбранной области; включение функции формирования лог-файла (протоколирования) процесса обработки; отображение полученных данных в виде графиков в реальном времени с возможностью их масштабирования и при необходимости сохранения как изображений; глобальное управление процессом обработки, т.е. включение паузы, возобновление обработки или отмена функции. Данное программное обеспечение разработано на языке Java с использованием библиотек OpenCV, Tesseract, JFreeChart и Swing. Система успешно прошла апробацию в испытательно-исследовательском центре Полоцкого государственного университета.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Qi Liang. Fundamental Tests on a Structural Health Monitoring System for Building Structures Using a Single-board Microcontroller / Qi Liang, Akinori Tani, Yuichiro Yamabe // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. – 2015. – Vol. 14, iss. 3 – P. 663–670.
2. Методика сопровождения развития структурных дефектов в цементных системах / Д.Н. Шабанов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 16. – С. 67–71.
3. Kongshaug, S. Experimental investigation of ASR-affected concrete – The influence of uniaxial loading on the evolution of mechanical properties, expansion and damage indices / S. Kongshaug [et al.] // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 245.
4. Malekia, M. On the effect of ITZ thickness in meso-scale models of concrete / M. Malekia [et al.] // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 258.
5. Ahmadi, M. New empirical approach for determining nominal shear capacity of steel fiber reinforced concrete beams / M. Ahmadi [et al.] // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 234.
6. Zalegowski, K. Relation between microstructure, technical properties and neutron radiation shielding efficiency of concrete / K. Zalegowski [et al.] // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 235.
7. Li, P.P. Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete / P.P. Li [et al.] // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 242.
8. Tesseract: an Open-Source Optical Character Recognition Engine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.linuxjournal.com/article/9676>. – Дата доступа: 13.02.2019.
9. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Изд. 3-е, исправл. и доп. – М. : Техносфера, 2012. – 1104 с.

Поступила 14.07.2020

#### INTEGRATED VIDEO MONITORING SYSTEM TO TEST STRENGTH AND DEFORMABILITY OF BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES

**R. BOHUSH, D. GLUKHOV, A. YAGUBKIN, E. SKRIPELYOV**

*The paper proposes the architecture of a video monitoring system for the state and ongoing physical processes in a building material or structure during stress testing. It is based on the use of video cameras and an algorithm for image sequence processing for reading, recognizing and writing to a personal computer the readings of digital devices in real time. An algorithm for processing video data has been developed, which includes frame-by-frame capture of video streams, digital display area segmentation, improving the image quality of the selected area, digital data recognition, obtained values post-processing. The results are displayed online on the monitor screen and can be saved to a file, which provides an opportunity for further analysis. The proposed system has been tested in the testing and research center of Polotsk State University and is promising for testing elements of building structures using digital measuring instruments.*

*Keywords: material and structure testing, video monitoring, image processing, computer system.*

УДК 614.841.11: 666.973.6

**ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТВЕРДОСТИ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ОХЛАЖДЕНИИ ВОДОЙ**

*канд. техн. наук, доц. О.Г. ГОРОВЫХ, А.В. ВОЛОСАЧ*  
(Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск)

*В статье представлены результаты измерения поверхностной твердости образцов ячеистого газобетона (марка D500) после термического воздействия на них в интервале температур от 100 до 1000°C, охлаждения водой и последующей выдержки (сушки) при комнатной температуре в течении 10 мин, одного часа и 24 часов. Измерения поверхностной твердости образцов осуществлялись специально разработанным устройством с определенным углом заточки индентора и фиксированной ударной силой. Полученные в ходе исследований результаты изменения поверхностной твердости ячеистого газобетона после охлаждения водой и сушки в течении 24 часов имеют линейный характер, что позволяет рекомендовать к применению результаты данных измерений в качестве одного из методов установления очага пожара в практике пожарно-технических (термических) исследований.*

**Ключевые слова:** ячеистый газобетон, термическое воздействие, охлаждение, пожар, пожарно-техническая экспертиза, очаг пожара, очаговые признаки.

**Введение.** Использование ячеистого бетона в строительстве принимает во всем мире все более масштабный характер. Это один из самых востребованных строительных материалов, т.к. обладает множеством достоинств (обеспечивает снижение монтажных, эксплуатационных и экологических затрат, гарантирует долгий срок службы и качество жилья), не имеет аналогов и занимает лидирующие позиции в сфере гражданского и промышленного строительства. В настоящее время в Республике Беларусь годовой объем производства газобетонных изделий составляет 3–4 млн м<sup>3</sup> [1].

Прочностные характеристики изделий из газобетона автоклавного твердения позволяют возводить здания высотой до пяти этажей [2]. Из газобетона изготавливаются армированные изделия: плиты перекрытия, покрытия, лестничные ступени, различные перемычки, в том числе и арочные [3–6]. Конструктивно-теплоизоляционные свойства делают его универсальным материалом для использования во всех климатических зонах. Блоки из ячеистых бетонов предназначены для кладки наружных и внутренних стен, стен подвалов и перегородок зданий с относительной влажностью воздуха помещений не более 75% и при неагрессивной среде.

Ячеистый бетон не содержит токсичного наполнения и, соответственно, не выделяет токсичных для человека и окружающей среды веществ, в том числе и во время пожара.

Несмотря на то, что газобетон относится к негорючим материалам с пределом огнестойкости REI = 180...240, пожары в строениях, возведенных из газобетона, регулярно возникают, при этом горит горючая нагрузка, имеющаяся в этих помещениях. Статистические данные свидетельствуют о том, что в последние годы в Республике Беларусь сохраняется значительный уровень числа пожаров, происходящих с материальными потерями и человеческими жертвами. Так, по данным Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, в нашей стране ежегодно происходит свыше 6 тысяч пожаров, к примеру, в 2019 году произошло 6132 пожара [7]. Рассмотрение и анализ фактов, связанных с пожарами, является одним из важнейших направлений деятельности органов государственного пожарного надзора МЧС РБ. Основным источником информации о пожаре является само место его возникновения [8].

Для строений, имеющих конструкции из древесины, металла (стали), железобетона, кирпича, специалистами в области расследования пожаров предложено достаточное количество различных методик, позволяющих по степени разрушения конструкций и их физико-механическим свойствам, например, таким как скорость прохождения ультразвука через исследуемые конструкции [9], установить область наибольших разрушений в результате воздействия высокой температуры и определить место нахождения очага пожара. Для построек из газобетона таких полноценных экспертных методик на сегодняшний день не предложено. Не в последнюю очередь это связано с неоднородностью самой структуры газобетона, недостаточно равномерно распределенной мелкодисперсной ячеистой структурой, нечетко выраженными изменениями физико-механических свойств, по которым можно устанавливать температурный режим, ранее воздействовавший на объекты из газобетона.

**Основная часть.** Для большинства пожаров при производстве пожарно-технической экспертизы и формировании вывода о месте нахождения очага инспектору вполне достаточно результатов визуального осмотра строительных конструкций и предметов, составляющих окружающую обстановку места происшествия. Однако в случае наличия таких факторов, как: а) архитектурные особенности отдельных

помещений или здания в целом; б) распространение пожара на большие площади; в) практически полное выгорание пожарной нагрузки; г) изменение либо нивелирование визуальных признаков очага, одним из основных источников информации становятся строительные конструкции и ограждения как наиболее сохраняемые после пожара. Для установления температурного поля пожара, имеющего связь с термическими поражениями конструкций, необходимо использовать инструментальные методы исследования подвергшихся тепловому воздействию конструкций [10].

При пожарах возникают и дополнительные воздействия на строительные конструкции, которые вместе с температурным воздействием оказывают на них значительное влияние. Один из таких факторов – резкое колебание температуры, вызванное условиями охлаждения при выполнении аварийно-спасательных работ на пожаре.

Так как по разным объективным и субъективным причинам осмотр места пожара проводится в разное время после ликвидации, пожара важно знать, какие признаки очага пожара даже при резком температурном перепаде и воздействии струй воды будут сохраняться на всем том возможном временном интервале, когда обычно проводится осмотр места пожара.

**Постановка проблемы.** Известно, что в результате воздействия высоких температур на пожаре, происходит изменение физико-механических свойств строительных конструкций [11]. При производстве пожарно-технической экспертизы (или при осмотре места пожара) зачастую необходимо определить температуру на участках строительных конструкций, поврежденных в результате теплового воздействия пожара. Закономерности изменения физико-механических свойств ячеистого бетона при длительном или кратковременном высокотемпературном воздействии, которые могут быть использованы при определении очага пожара (изменение цвета, количества и вида трещин, отслаивание и т.д.), описаны в работах [4; 5; 12].

Однако влияние условий охлаждения на прочностные характеристики (физико-механические свойства) газобетонов, ранее подвергшихся термическому воздействию, в данных работах и работах других авторов не отражены. При тушении пожара конструкции горящего строения подвергаются резкому охлаждению, причем при достаточно низкой температуре внешней среды высыхание конструкций, выполненных из ячеистого бетона, может продолжаться достаточно длительное время, достигающее до суток и более. Для выявления возможности определения очага пожара в зданиях, выполненных из ячеистого бетона, когда на строительные конструкции воздействовала сначала высокая температура, а затем интенсивное охлаждение, и посвящено данное исследование.

Газобетон является композиционным материалом, поэтому наблюдаемое изменение его физико-механических свойств, его поведение при нагреве на пожаре зависит как от поведения его отдельных компонентов (гидроксида кальция, оксида кремния, оксидов алюминия и железа и их гидратных и силикатных форм), так и от силы и вида их взаимодействия между собой.

**Методика экспериментальных исследований.** Для исследований было подготовлено 20 образцов призм из ячеистого газобетона марки по средней плотности D500 согласно [6] с усредненными размерами 100×100×120 мм. Размеры образцов были обусловлены ограничениями оборудования – внутреннего пространства муфельной печи SNOL-8,2/1100 с цифровым терморегулятором.

План проведения подготовки образцов предусматривал 10 серий термического воздействия и включал нагревание образцов от 100 до 1000 °С (с шагом в 100 °С) в течение 20 минут. Для каждой температуры было взято по два образца. Образцы помещали в муфельную печь, заранее разогретую до соответствующей температуры. После загрузки образцов в печь дополнительно повышали температуру до требуемого значения, так как при открывании печи для загрузки образцов она снижалась. Скорость подогрева от момента помещения образцов в печь до достижения требуемой температуры составляла 1 градус за 4–5 секунд. После достижения в печи соответствующей температуры выдерживали в ней образцы в течение 20 минут.

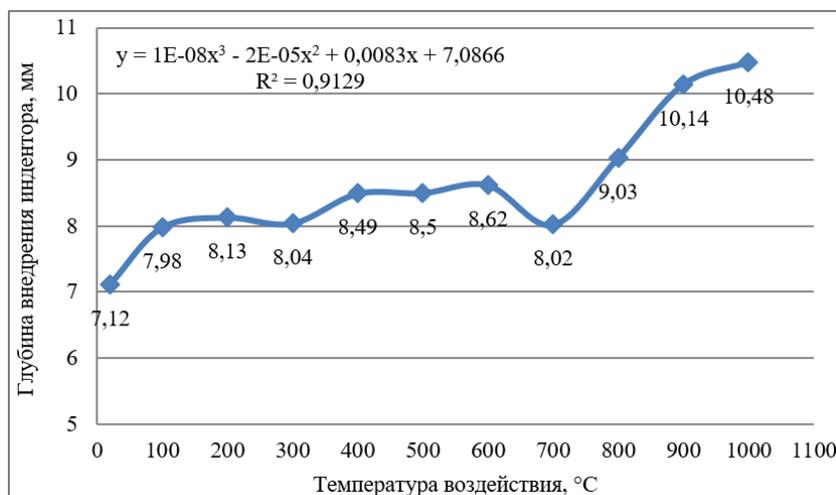
Затем образцы из ячеистого газобетона извлекали из печи. Охлаждение образцов проводили в водной среде, имеющей температуру 10 °С, хотя в отдельных случаях на пожаре возможно и более интенсивное охлаждение конструкций. Охлаждение осуществлялось в течение 10 минут.

Для определения поверхностной твердости ячеистого газобетона, подвергшегося воздействию высоких температур, применялся метод измерения глубины (мм) погружения индентора в образец по аналогии с известным методом определения твердости по Роквеллу. Для сообщения индентору ударно-поступательного движения было использовано специально разработанное для этих целей приспособление с индентором из инструментальной стали твердостью 217 МПа (НВ), имеющим угол раствора конуса 30° и шероховатость поверхности конуса Ra = 12,5 [5].

Поверхность для испытаний выбирали так, чтобы она была ровной и плоской, не имела грубых рифов, выбоин, царапин. Поверхность перед испытанием очищали от пыли мягкой кисточкой. Толщина контролируемого образца была как минимум больше 12-кратной глубины внедрения индентора.

Измерения проводились по методике, изложенной в [5]. Было проведено 600 измерений для образцов, охлаждаемых в воде (для каждого образца измерения проводились с интервалами 10 минут, 1 час и 1 сутки после извлечения из водной среды), а также 200 измерений для образцов, охлаждаемых без дополнительного обдува в температурных условиях помещения лаборатории.

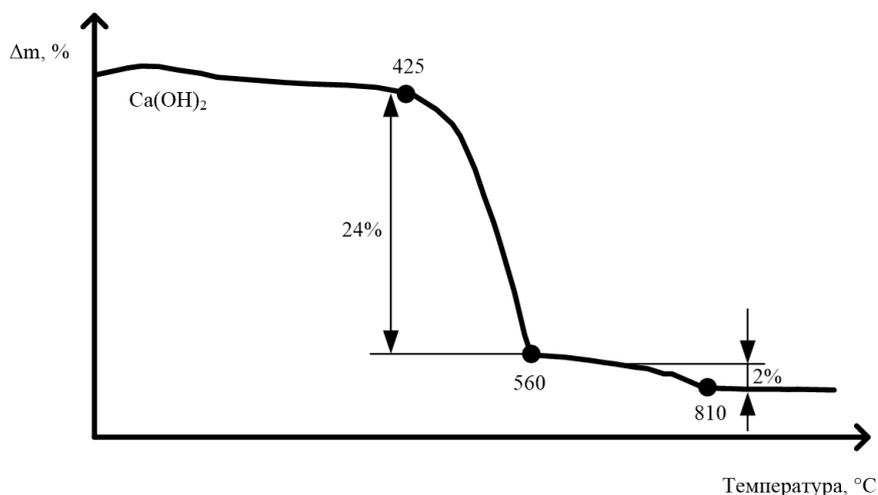
**Результаты экспериментальных исследований.** На рисунках 1 и 3–6 показаны графики, отражающие глубину погружения индентора в образцы в зависимости от воздействующей на них температуры и условий охлаждения. Точка на графике отображает среднее значение, полученное от проведения 10 измерений.



**Рисунок 1.** – Глубина внедрения индентора в образцы ячеистого газобетона через 10 минут после извлечения из водной среды

Из представленного на рисунке 1 графика видно, что при повышении температуры происходит постепенное увеличение глубины погружения индентора в исследуемые образцы (снижение поверхностных прочностных характеристик). Это можно объяснить тем, что при нагреве выше 100 °C начинает происходить постепенная дегидратация имеющихся соединений, и чем выше температура, тем больше степень дегидратации и наблюдаемые при этом разрушения. Исключение составляет температура воздействия 700 °C. При этой температуре фиксируется anomalно малое снижение поверхностной твердости исследуемого материала по сравнению с образцами, обработанными при рядом находящихся температурах, что выражается в снижении глубины внедрения индентора в образцы.

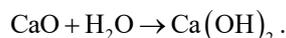
Объяснить упрочнение, возникающее при температуре 700 °C можно исходя из кривой убыли массы (рисунок 2) для гидроксида кальция (одного из компонентов газобетонов) [13]. Из кривой убыли массы видно, что начало разложения гидроксида кальция начинается при температуре 425 °C и разлагается с потерей 24% массы до температуры 560 °C, что при теоретическом расчете по уравнению разложения составляет 98,6%.



**Рисунок 2** – Кривая убыли массы гидроксида кальция при воздействии температуры

Так как газобетон включает гидроксид кальция как компонент, то, вероятно, его окончательное разложение под влиянием имеющихся рядом соединений происходит при более высокой температуре,

достигающей 700 °С. Контакт с водой обеспечивает поверхностную гидратацию образовавшегося оксида кальция, а высыхание образцов в последующие 10 минут, в свою очередь, вызывает образование иной структуры, имеющей повышенную твердость по сравнению с образцами, имеющими меньшую воздействующую температуру и не полностью до этого подвергшихся дегидратации.



Исключая область с температурой воздействия около 700 °С, измерение глубины внедрения индентора непосредственно после окончания тушения пожара (10 мин контакта с водой) позволяет четко выделить области с температурой воздействия на них более 800 °С. Кроме того, даже при наличии слоя сажи в области дымового воздействия, можно четко установить области, подвергшиеся низкотемпературному воздействию (до 100 °С).

Из графика на рисунке 3 видно, что при проведении исследований конструкций через час после окончания тушения, все также легко определяемы области с наибольшим и наименьшим температурным воздействием. При этом исчезает область с аномально высокой твердостью, имеющая место на рисунке 1 ( $t_{\text{воз}} = 700^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{высых}} = 10$  минут). Наиболее равномерное (линейное) изменение поверхностной твердости наблюдается в интервале температур 300–800 °С.

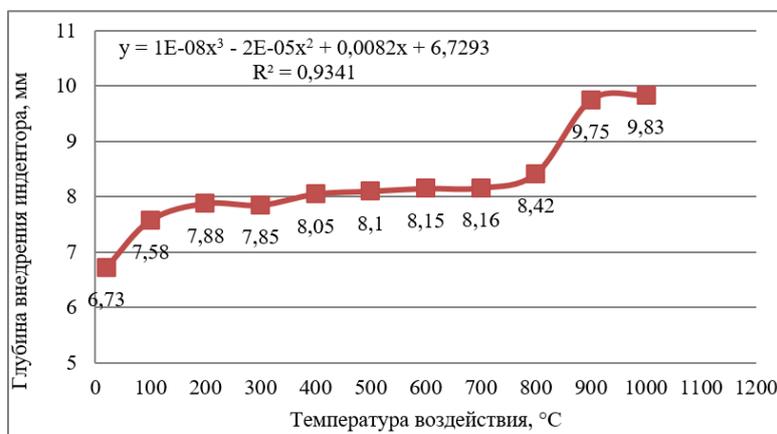


Рисунок 3. – Глубина внедрения индентора в образцы через 1 час после извлечения из водной среды

При проведении исследований через сутки (24 часа высыхания) можно с высокой степенью вероятности установить области, на которые воздействовали различные температуры. Однако наблюдается аномальное снижение твердости у обработанных при 200 °С образцов, которое соизмеримо с температурой воздействия примерно 350 °С (рисунок 4). Возможно, потеря гидратной воды у гидроалюминатов, происходящая при температуре 200 °С, не привела к их регенерации за 1 час, что определило заниженную твердость у этих образцов (хотя объяснить данное снижение твердости достаточно трудно).

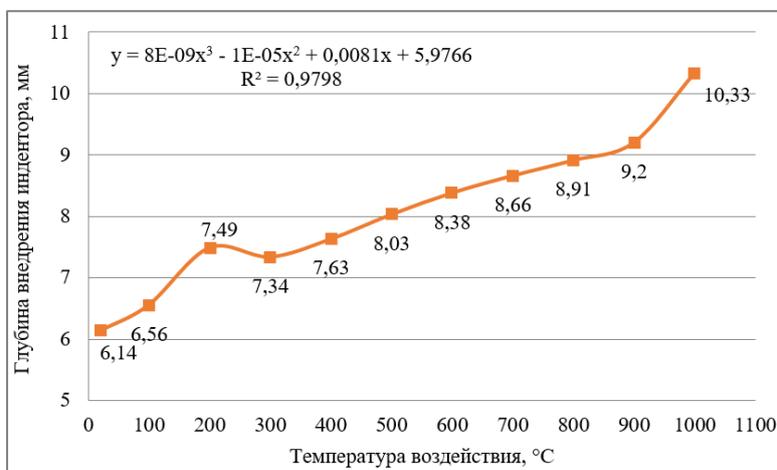


Рисунок 4. – Глубина внедрения индентора в образцы через 1 сутки после извлечения из водной среды

Из представленного на рисунке 5 графика видно, что мягкие условия охлаждения (воздушное охлаждение) не дают такой четко выраженной закономерности изменения поверхностной твердости, как при быстром охлаждении водой.

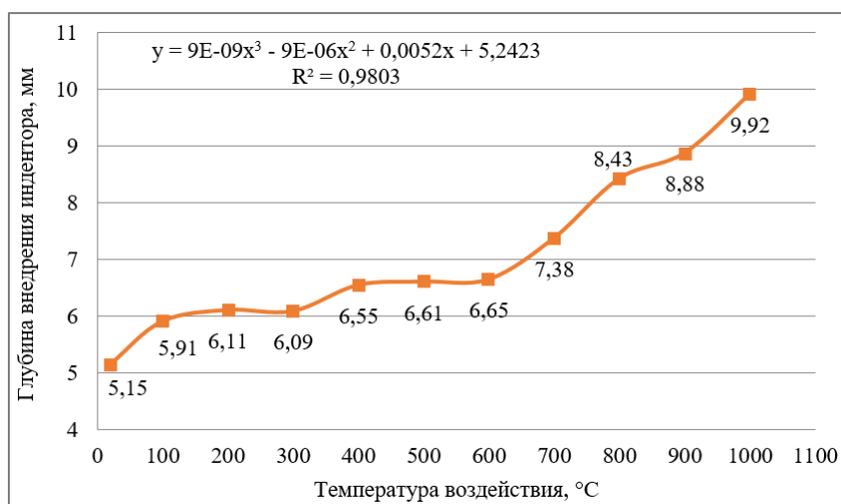


Рисунок 5. – Глубина внедрения индентора в образцы, охлаждаемые в температурных условиях помещения лаборатории (без воздействия воды)

Из графиков на рисунке 6 видно, что наибольшая потеря прочности наблюдается при охлаждении водой и исследовании образцов через 10 минут после охлаждения во всем исследованном интервале температур, anomalно низкое снижение твердости наблюдается при температуре 700 °C.

Затем по мере высыхания образцов происходит нарастание поверхностной твердости, что говорит о том, что при этом происходит восстановление ранее разрушенных связей между компонентами газобетона и их гидратация.

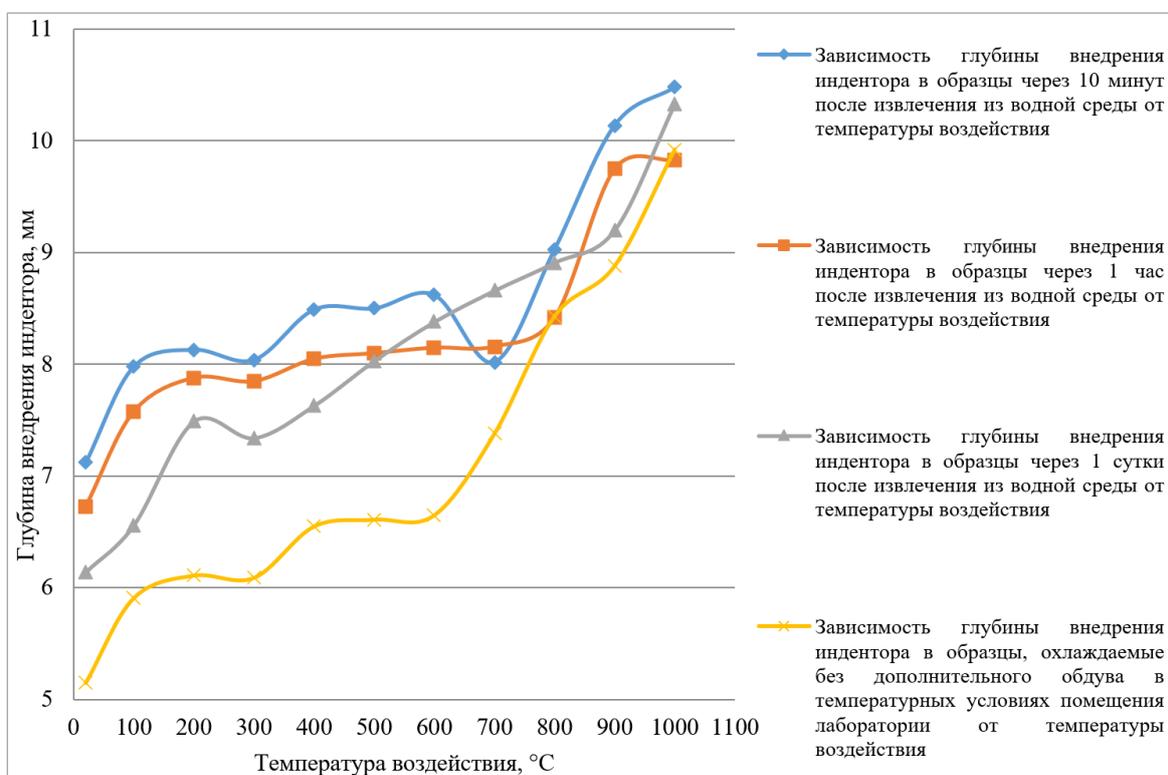


Рисунок 6. – Сводный график изменения поверхностной твердости через различные промежутки времени после охлаждения образцов

Снижение твердости по мере высыхания образцов, обработанных при температуре 700 °С говорит о том, что образовавшиеся при гидратации соединения термодинамически неустойчивы и разрушаются с образованием более устойчивых, но менее твердых соединений.

Можно видеть, что поверхностная твердость у образцов, высушенных в течение суток, имеет линейный характер за исключением образцов, обработанных при 200 °С.

Воздушное охлаждение незакономерно влияет на изменение поверхностной твердости, что связано, возможно с различной теплопроводностью, полученных на поверхности образцов соединений и разными процессами при гидратации образовавшихся оксидов, на которые влияет в том числе и влажность в помещении и иные неучтенные факторы.

На основании полученных значений поверхностной твердости можно утверждать, что если у образцов непосредственно после тушения, через 1 час и через сутки твердость увеличивается, то можно легко разграничить температуры воздействия от 100 до 500 °С.

Для установления температурного поля на месте пожара для более высоких температур (начиная с 500 °С) достаточно опереться только на измерения, осуществленные через 1 сутки высыхания после тушения пожара.

Для получения достоверных данных при проведении изменений непосредственно на конструкциях на месте пожара предлагается предварительно выделенные места, дополнительно обработать водой из пульверизатора, отметить их на карте места пожара, и затем произвести измерение через 1 сутки.

**Заключение.** Одним из востребованных на сегодняшний день направлений при производстве пожарно-технической экспертизы является исследование воздействия высоких температур на строительные конструкции, в частности, изготовленные на основе ячеистых бетонов.

Процесс разрушения газобетона хорошо заметен визуально при температурах более 900 °С, когда газобетон начинает разрушаться, в том числе и из-за полной дегидратации составляющих компонентов.

Результаты проведенных исследований показывают, что поверхностная прочность газобетона достаточно плавно изменяется при воздействии высоких температур.

Можно делать вывод о том, что данный метод исследования образцов на месте пожара может быть успешно применен для обнаружения очага пожара, причем замеры поверхностной твердости наиболее целесообразно проводить через сутки после проведения работ по тушению пожара.

Данную методику можно использовать для выявления области наибольшего воздействия температуры при одновременном подтверждении результатов и другими методами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сахаров, Г.П. Развитие производства и повышение конструктивных свойств автоклавного ячеистого бетона и изделий на его основе / Г.П. Сахаров // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 7 Междунар. науч.-практ. конф., Брест, Малорита, 22–24 мая 2012 г. / Редкол.: Н.П. Сажнев (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Стринко, 2012. – С. 32–36.
2. Мартыненко, В.А. Теоретические и структурные свойства ячеистого бетона / В.А. Мартыненко // Theoretical Foundations of Civil Engineering : Збірник наук. праць ПДАБА і Варшавського техн. універ. – Dnepropetrovsk-Warsaw, 2003. – С. 177–186.
3. Волосач, А.В. Изменение величины сорбции ячеистых бетонов после термического воздействия / А.В. Волосач, О.Г. Горовых // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2018. – № 1 (43). – С. 57–64.
4. Горовых, О.Г. Определение очага пожара по визуально наблюдаемым изменениям ячеистого бетона после термического воздействия / О.Г. Горовых, А.В. Волосач // Судебная экспертиза Беларуси. – 2017. – № 1. – С. 59–62.
5. Волосач, А.В. Результаты экспериментальных исследований поверхностной твердости ячеистых бетонов, подвергшихся температурному воздействию, инденторами с углами раствора конуса 20–55 / А.В. Волосач, О.Г. Горовых // Вестн. ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 13–22.
6. Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия : ГОСТ 31359-2007. – Введ. 1.01.2009. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2009. – 9 с.
7. Информация о чрезвычайных ситуациях [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://mchs.gov.by/operativnaya-informatsiya/sutochnye-svodki-mchs/v-rb/292675/>. – Дата доступа: 22.04.2020.
8. Чешко, И.Д. Анализ экспертных версий возникновения пожара / Чешко И.Д., Плотников В.Г. – СПб. : филиал ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2010. – 708 с.
9. Применение инструментальных методов и технических средств в экспертизе пожаров : сб. метод. рек. / под ред. И.Д. Чешко и А.Н. Соколовой. – СПб. : СПбФ ВНИИПО, 2008. – 279 с.
10. Пахомов, М.Е. Техничко-криминалистическое обеспечение раскрытия и расследования преступлений, связанных с пожарами / М.Е. Пахомов // Вестн. Волгоград. акад. МВД России. – 2015. – № 1. – С. 112–115.

11. Дашков, Л.В. Экспертные пожарно-технические исследования строительных материалов зданий при установлении очага пожара / Л.В. Дашков, Г.В. Плотникова, В.Ф. Гольчевский // Вестн. Восточ.-Сиб. ин-та МВД России, № 4 (71). – 2014. – С. 61–67.
12. Горовых, О.Г. Исследование поверхностной твердости ячеистых бетонов, подвергшихся температурному воздействию / О.Г. Горовых, А.В. Волосач // Судебная экспертиза Беларуси. – 2019. – №. 1. – С. 54–58.
13. Шаяхметов, А.У. Особенности термического разложения оксида, пероксида, гидроксида и карбоната кальция / А.У. Шаяхметов, А.Г. Мустафин, И.А. Массалимов // Вестн. Башкир. ун-та. – 2011. – Т. 16. – № 1. – С. 29–32.

Поступила 14.05.2020

## CHANGE IN THE SUPERFICIAL HARDNESS OF CELLULAR CONCRETES UNDER THERMAL ACTION AND FOLLOWING COOLING WITH WATER

**O. GOROVYKH, A. VOLOSACH**

*The article presents the results of measuring the surface hardness of aerated concrete samples (grade D500) after thermal exposure to them in the temperature range from 100 to 1000 °C, cooling with water and subsequent exposure (drying) at room temperature for 10 minutes, one hour and 24 hours. Measurements of the surface hardness of the samples were carried out by a specially developed device with a definite indenter sharpening angle and a fixed impact force. The results of studies of the changes in the surface hardness of aerated concrete after cooling with water and drying for 24 hours are linear in nature, which allows us to recommend the use of the measurement data as one of the methods for establishing the fire source in the practice of fire-technical (thermal) research.*

**Keywords:** *cellular aerated concrete, thermal effects, cooling, fire, fire-technical expertise, fire center, focal signs.*

УДК 658.5

**ВНЕДРЕНИЕ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ В ОТРАСЛИ  
СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

*канд. техн. наук, доц. О.В. ЛАЗАРЕНКО, А.Н. ЯГУБКИН  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрены этапы внедрения BIM-технологий в отрасли строительного комплекса Республики Беларусь: проектирование, кадровое обеспечение. Отмечены преимущества технологии информационного моделирования, выявлены особенности ее внедрения в республике, необходимость подготовки, переподготовки и повышения квалификации кадров строительной отрасли для адаптации их в современных условиях проектирования жизненного цикла объектов. Приводятся примеры организации внедрения BIM-технологий на инженерно-строительном факультете Полоцкого государственного университета.*

**Ключевые слова:** государственные программы, информационное моделирование, проектирование, кадровый потенциал.

**Введение.** Строительный комплекс Республики Беларусь включает строительство – создание, реконструкцию действующих основных фондов, а также отрасли, обеспечивающие для него выполнение научно-исследовательских, проектно-изыскательских, опытно-конструкторских работ и подготовку кадров. В современных условиях создание конкурентоспособной строительной продукции, эффективное распределение материальных, финансовых и людских ресурсов на всех стадиях жизненного цикла зданий и сооружений, повышение экспортного потенциала на рынках единого экономического пространства невозможно без внедрения технологии информационного моделирования зданий или сооружений (BIM). BIM (Building Information Model) – это трехмерная, комплексная, информационная, компьютерная модель здания или сооружения, содержащая архитектурно-конструкторскую, технологическую, экономическую и другую информацию. Применение BIM позволяет оперативно принимать управленческие решения, необходимые обновления на всех этапах жизненного цикла здания (проектирование, эксплуатация, реконструкция, снос), сокращать стоимость и сроки строительства [1].

**Основная часть.** Внедрение технологии информационного моделирования в отрасль проектирования строительных объектов на уровне единой государственной технической политики началось в республике в 2010 году.

В октябре 2010 года Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 1589 утверждена «Концепция развития строительного комплекса Республики Беларусь на 2011–2020 годы». В январе 2012 года вышло постановление Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь № 4, которым утверждена «Отраслевая программа по разработке и внедрению информационных технологий комплексной автоматизации проектирования и поддержки жизненного цикла здания, сооружения на 2012–2015 годы». Цель программы – внедрение информационных систем и технологий, повышающих эффективность производства, качество и конкурентоспособность продукции и услуг в строительной отрасли [2].

Реализация программы выполнялась поэтапно: разработка и дополнения нормативно-правовой базы в области строительства [3; 4], внедрение технологий информационного моделирования в пилотное и реальное архитектурно-строительное проектирование значимых объектов г. Минска ведущими проектными организациями УП «Белпромпроект», УП «Минскпроект» (рисунки 1, 2) [5].

Внедрению технологии информационного моделирования в этот период препятствовали:

- необходимость создания локальной сети или «облака» для всех участников, работающих над проектом и, соответственно, значительные материальные вложения в приобретение компьютерной техники и лицензионных программ, переподготовку и обучение сотрудников новым технологиям;
- неготовность строителей работать с BIM-проектами ввиду отсутствия материальной базы для использования данных технологий на строительной площадке, неподготовленностью работников к использованию информационной модели;
- отсутствие понимания со стороны отечественных инвесторов необходимости BIM-технологий из-за недостаточного количества примеров их использования на строительном рынке Беларуси и, как следствие, нежелание оплачивать увеличенную до 30% стоимость проектных работ.

Дальнейшее внедрение технологий информационного моделирования в проектирование, а также подготовку, переподготовку и повышение квалификации специалистов строительных специальностей было определено в приказе Министерства архитектуры и строительства № 70 от 16 марта 2018 г. «О внедрении технологии информационного моделирования» [6]. В приказе указывалось, что до декабря 2019 года

необходимо разработать или усовершенствовать образовательные стандарты Республики Беларусь, устанавливающие требования, необходимые для обеспечения качества образования, и определяющие содержание образовательных программ подготовки или переподготовки руководящих работников и специалистов по специальностям, определенным в отраслевой программе, и дополнительно по специальностям «Производство строительных изделий и конструкций», «Экспертиза и управление недвижимостью», «Автоматизация проектирования и управления в строительстве».



Рисунок 1. – Пилотный проект производственного корпуса киностудии «Беларусьфильм», выполненный в BIM (УП «Белпромпроект»)

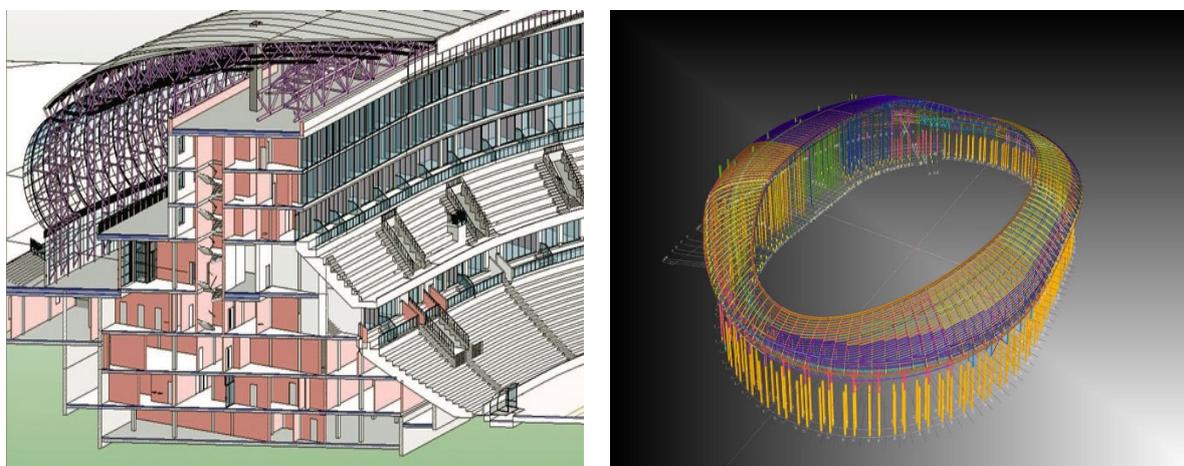


Рисунок 2. – Совместный проект реконструкции стадиона «Динамо» в Минске (УП «Минскпроект»; ООО «Белэнергомаш», г. Белгород)

Значимым руководством к действию всех участников строительства стала директива № 8 Президента Республики Беларусь от 4 марта 2019 г. [7], где были определены приоритетные направления развития строительного комплекса, одними из которых являются внедрение технологии информационного моделирования на всех этапах жизненного цикла объектов строительства и подготовка инновационного кадрового потенциала.

В постановлении Совета Министров Республики Беларусь № 296 от 14 мая 2019 г. «О реализации Директивы Президента Республики Беларусь от 4 марта 2019 г. № 8» [8] были прописаны дальнейшие действия по внедрению технологий информационного моделирования:

- до декабря 2019 года обеспечить обязательное применение технологии информационного моделирования на всех этапах жизненного цикла объектов строительства, финансируемых полностью или частично за счет средств республиканского и (или) местных бюджетов [8, п. 6];
- до января 2022 года обеспечить обязательное применение технологии информационного моделирования на всех этапах жизненного цикла иных объектов строительства [8, п. 6.2];
- в 2019–2025 годах выполнить реализацию научно-исследовательских, опытно-конструкторских, опытно-технологических работ по созданию соответствующих информационных систем и ресурсов, включая создание ядра Государственного строительного портала, сформировать центр по информатизации строительного комплекса [8, п. 57]. Также был утвержден план мероприятий по актуализации профессионально-квалификационной структуры подготовки кадров и содержания образовательных стандартов с учетом современных тенденций развития строительной отрасли, обеспечению подготовки кадров по новым специальностям, необходимым для развития высокоэффективных производств на 2019–2025 годы.

Следует отметить, что совершенствование образовательных стандартов Республики Беларусь по строительным специальностям, направленное на внедрение BIM-технологий при подготовке кадров, на сегодняшний день практически не выполнено: в государственных образовательных стандартах присутствует только часть необходимых компетенций для внедрения BIM-технологий, например, в стандарте специальности 1-70 02 02 «Экспертиза и управление недвижимостью» 2020 года, прописаны требования к компетенциям специалиста общего характера: «владеть основными методами сбора, обработки и хранения информации, знать языки программирования и уметь использовать полученные знания для решения практических задач» [9], которые были ранее в стандарте 2013 года.

В связи с этим высшие учебные заведения внедряют BIM-технологии при подготовке и переподготовке кадров в соответствии с указами, постановлениями Республики Беларусь [2; 3; 7; 8], а не образовательными стандартами.

В Полоцком государственном университете на инженерно-строительном факультете внедрение BIM-технологий ориентировано на интеграцию дисциплин, сквозное курсовое и дипломное проектирование при подготовке бакалавров по строительным специальностям «Архитектура», «Промышленное и гражданское строительство», «Автомобильные дороги», «Экспертиза и управление недвижимостью» и магистров по специальности «Строительство».

В результате изучения общепрофессиональных («Информатика», «Инженерная геодезия») и специальных дисциплин («Архитектура», «Металлические конструкции», «Железобетонные и каменные конструкции», «Конструкции из дерева и пластмасс», «Механика грунтов, основания и фундаменты», «Экономика строительства», «Проектирование реконструкции зданий и сооружений», «Управление проектами в строительстве», «Строительство автомобильных дорог», «Реконструкция автомобильных дорог») студенты получают целостное представление о многоэтапном проектировании и неразрывной взаимосвязи всех интеллектуальных технических элементов здания (smart building), сооружения, применении BIM, начиная с объемно-планировочного решения до проекта организации его строительства.

Преподавание дисциплин, руководство курсовыми и дипломными проектами с применением BIM-технологий проводится в последовательности, совпадающей с жизненными циклами строительного объекта с использованием соответствующего программного обеспечения:

1. Прединвестиционный цикл: предпроектная документация, технико-экономическое обоснование, инженерные изыскания. Обработка результатов геодезических, геологических изысканий в программе Autodesk Civil 3D.
2. Инвестиционный цикл: создание информационных моделей (BIM) объекта. На основе созданной модели с использованием программ Autodesk Revit, Autodesk Robot, ABC-РНТЦ, «Кредо дороги» осуществляется:
  - разработка архитектурно-строительной части проекта;
  - проектирование и конструирование конструктивных элементов конструктивной части проекта;
  - разработка сметной части проекта.
3. Цикл строительства: взаимодействие с информационной моделью технического, авторского, государственного строительного надзоров.

4. Цикл эксплуатации объекта (управление и эксплуатация объектом): взаимодействие с информационной моделью решений по текущему, капитальному ремонту, реконструкции, модернизации, реставрации, сносу.

На основе созданных информационных моделей (BIM) разработка цифрового двойника объекта (digital twin) на стадии его эксплуатации для принятия оптимальных технологических и организационных решений по эффективной и надёжной эксплуатации ведется с использованием программ Autodesk Revit, Autodesk Navisworks Manage, Microsoft Project.

В целях формирования у студентов понимания неразрывности связи всех интеллектуальных технических элементов здания, сооружения (smart building), навыков многоэтапного проектирования цифровой двойник объекта разрабатывается с информацией о всех его жизненных циклах, что позволяет вносить изменения в любом цикле, оперативно получать необходимые обновления. Полученные практические навыки обеспечат студентам готовность к дипломному проектированию и дальнейшей профессиональной деятельности, необходимой для развития высокоэффективных технологий строительного комплекса.

К сожалению, внедрение BIM-технологий при подготовке специалистов строительного профиля в полном объеме преподаваемых дисциплин ограничено высокими материальными затратами на приобретение программного обеспечения, новейшего компьютерного оборудования для выполнения сложных расчетов и хранения больших объемов информации.

В связи с этим в 2019 году на кафедре «Строительное производство» студентом специальности «Промышленное и гражданское строительство» разработан и успешно защищён один дипломный проект с элементами BIM-технологий.

Элементы BIM-технологий с использованием программного обеспечения Autodesk Revit, Tekla Structures, IdeaStatica внедрены в следующие разделы дипломного проекта:

1. Инновационное решение.
2. Архитектурно-строительный раздел.
3. Расчетно-конструктивный раздел.
4. Технология строительного производства.
5. Организация строительного производства.

На первом этапе в программе Autodesk Revit была разработана архитектурная модель здания (рисунок 3, а). На основе архитектурной модели разработана расчётная схема и экспортирована в программу Tekla Structures для расчёта и подбора сечений конструктивных элементов (рисунок 3, б). После расчета конструктивных элементов модель экспортирована в программу Autodesk Revit для оптимизации в соответствии с архитектурной моделью (рисунок 3, в). Расчёт и конструирование узлов выполнялись в программе IdeaStatica с экспортом в программу Autodesk Revit (рисунок 3, г).

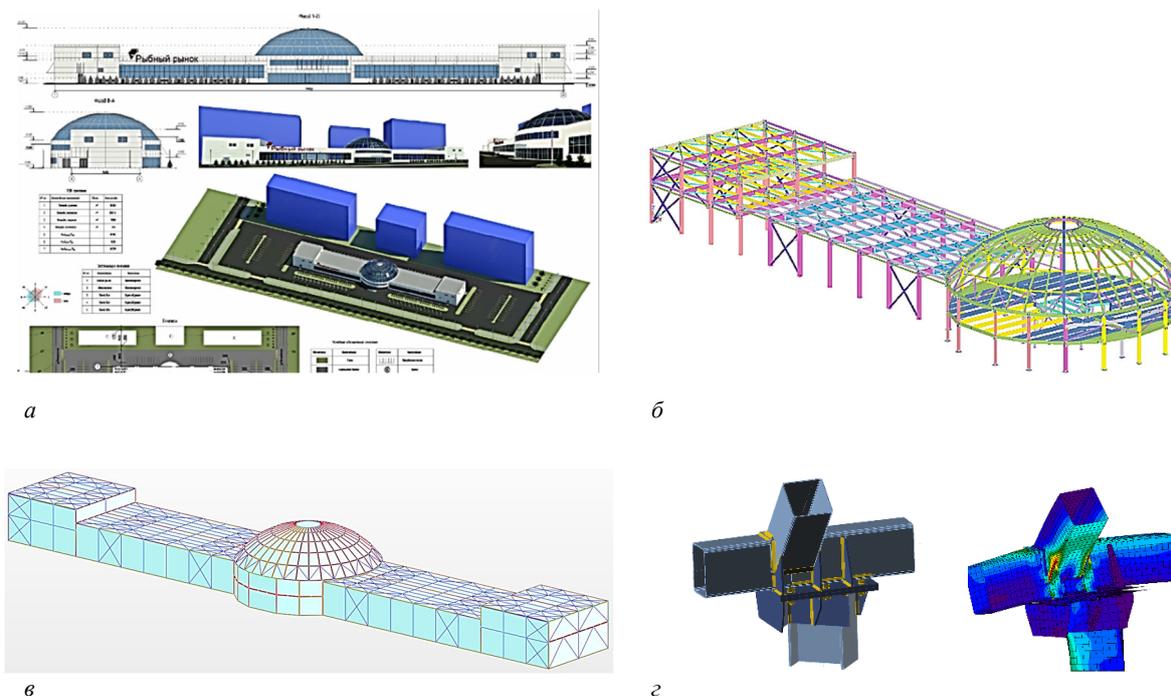


Рисунок 3. – Этапы разработки дипломного проекта «Рыбный рынок в г. Минске» по специальности «Промышленное и гражданское строительство» с внедрением BIM-технологий

В 2020 году на кафедре «Строительное производство» студентами специальности «Экспертиза и управление недвижимостью» были разработаны и успешно защищены три дипломных проекта с элементами BIM-технологий.

На первом этапе в программе Autodesk Navisworks Manage разработан цифровой двойник объекта недвижимости с информацией о всех его жизненных циклах:

- инвестиционный цикл с BIM-моделями архитектурно-строительной, конструктивной частей, стройгенплана;
- цикл строительства объекта с BIM-моделями технической экспертизы с дефектами элементов здания, авторского, государственного строительного надзоров,
- цикл эксплуатации с BIM-моделью состояния здания, включающей информацию о стоимости и износе элементов здания, сроках текущих и капитальных ремонтов и т.п.).

В соответствии с приказом Министерства архитектуры и строительства «О внедрении технологии информационного моделирования» [6, п. 3.1] в Полоцком государственном университете осуществляется переподготовка руководящих работников и специалистов по специальности 1-53 01 71 «Автоматизация проектирования и управления в строительстве»; проводятся курсы повышения квалификации по программе «Autodesk Revit – основы BIM-моделирования зданий. Базовый курс».

В ближайшее время в Полоцком государственном университете планируется внедрить BIM:

1) при определении энергопотребления (энергетического баланса) здания – создание модели BEM, что позволит выделять наименее эффективные с энергетической точки зрения процессы и части здания для их оптимизации и принимать решения по уменьшению сроков и стоимости строительного проекта, стоимости эксплуатации здания;

2) для определения, мониторинга и прогнозирования процессов тепло- и массообмена в воздушной среде исследуемого объекта с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD, Computational Fluid Dynamics).

**Заключение.** Несмотря на ряд трудностей, связанных с материальными и интеллектуальными затратами, внедрение BIM-технологий в проектирование и подготовку кадров строительного комплекса в Республике Беларусь имеет положительные тенденции.

Дальнейшее стимулирование внедрения BIM-технологий: создание и наполнение в 2020–2021 гг. государственной информационной системы ГИС «Госстройпортал» для взаимодействия всех заинтересованных участников строительного процесса, формирование центра по информатизации строительного комплекса, создания цифровых двойников зданий и сооружений, а также «умных» зданий (smart buildings), позволят в ближайшей перспективе достичь полномасштабного внедрения технологии информационного моделирования, создания цифровых двойников (digital twins) зданий и сооружений, а также «умных» зданий (smart buildings) в строительный комплекс Республики Беларусь, повышения его конкурентоспособность на мировом рынке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Талапов, В.В. Технология BIM: суть и основы внедрения информационного моделирования зданий / В.В. Талапов. – М. : ДМК-пресс, 2015. – 410 с.
2. Об утверждении отраслевой программы по разработке и внедрению информационных технологий комплексной автоматизации проектирования и поддержки жизненного цикла здания, сооружения на 2012–2015 годы : постановление М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, от 31 янв. 2012 г., № 4 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2012. – № 2/1742.
3. Строительство. Проектная документация. Состав и содержание : ТКП 45-1.02-295-2014. – Введ. 01.04.2014. – Переизд. с изм. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2018. – 55 с.
4. Основные положения руководства по информационному моделированию зданий : СТБ ISO/TS 12911-2015. – Введ. 28.08.2015. – Минск : Госстандарт, 2015. – 29 с.
5. Инновации для сохранения наследия: использование BIM-проектирования при реконструкции стадиона «Динамо» в Минске. – Архитектура и строительство. – № 3. – 2019. – С. 58–60.
6. О внедрении технологии информационного моделирования [Электронный ресурс] : приказ М-ва архитектуры и стр-ва, 16 мар. 2018г., № 70. //РУП «Республиканский научно-технический центр по ценообразованию в строительстве». – Режим доступа: [http://www.upload.rstc.by/new/pr\\_2018\\_70.pdf](http://www.upload.rstc.by/new/pr_2018_70.pdf). – Дата доступа: 10.09.2019.
7. О приоритетных направлениях развития строительной отрасли [Электронный ресурс] / Директива Президента Респ. Беларусь, 4 мар. 2019 г., № 8 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа: [http://www.pravo.by/upload/docs/op/P01900008\\_1551733200.pdf](http://www.pravo.by/upload/docs/op/P01900008_1551733200.pdf). – Дата доступа: 07.09.2019.

8. О реализации Директивы Президента Республики Беларусь от 4 марта 2019 г. № 8 : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 14 мая 2019 г., № 296 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – 2019. – № 5/46457.
9. Образовательный стандарт высшего образования I ступени по специальности 1-70 02 02 «Экспертиза и управление недвижимостью» : ОСВО 1-70 02 02 – 2019. – Введ. 15. 02. 2020. – М-во образования Респ. Беларусь, 2020. – 11 с.

*Поступила 21.09.2020*

## **IMPLEMENTATION OF BIM TECHNOLOGIES IN THE INDUSTRY BUILDING COMPLEX OF THE REPUBLIC OF BELARUS**

***O. LAZARENKO, A. YAGUBKIN***

*The stages of implementation of BIM technologies in the construction industry of the Republic of Belarus are considered: design, staffing. The advantages of information modeling technology are noted, the features of its implementation in the Republic are revealed, as well as the need for training, retraining and advanced training of construction industry personnel to adapt them to modern conditions of designing the life cycle of objects. Examples of organization of implementation of BIM technologies at the faculty of civil engineering of Polotsk state University are given.*

***Keywords:*** *state programs, information modeling, design, human resources.*

УДК 691.328.32

**ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕСНЕННОЙ УСАДКИ КЕРАМЗИТОЖЕЛЕЗОБЕТОНА**

*д-р техн. наук, проф. С.Д. СЕМЕНЮК,  
канд. техн. наук, доц. Ю.Г. МОСКАЛЬКОВА, В.А. РЖЕВУЦКАЯ  
(Белорусско-Российский университет, Могилев)*

*В статье выполнен аналитический обзор отечественных и зарубежных исследований особенностей развития свободной и стесненной усадки для бетонов на плотных и пористых заполнителях. Рассмотрены две разные теории, удовлетворительно описывающие процесс усадки и не исключают друг друга. Освещены вопросы, связанные с влиянием компонентов заполнителей, цемента, водоцементного отношения и добавок на усадку керамзитобетона. Рассмотрены предложения по учету деформаций усадки в керамзитобетоне и керамзитожелезобетоне. Для более точного определения процесса накопления объемных усадочных деформаций и усовершенствования математической модели расчета относительных деформаций усадки в керамзитожелезобетоне разработана методика проведения испытаний на опытных образцах в виде призм, армированных продольной ненапрягаемой арматурой, с измерением деформаций усадки индикаторами часового типа.*

**Ключевые слова:** усадка, стесненная усадка, керамзитобетон, керамзитожелезобетон, объемные деформации.

**Введение.** Усадка легких бетонов на 15–25% больше усадки равнопрочных тяжелых бетонов. В первые периоды твердения легких бетонов (3–40 часов) наблюдается увеличение объема, вызванное тепловым расширением заземленного воздуха под влиянием экзотермической теплоты, затем наблюдается уменьшение, т.е. объемная усадка. Принято различать усадку контракционную, карбонизационную и влажностную.

Нарастание усадки, как и нарастание прочности бетона, происходит примерно пропорционально логарифму времени. При этом усадка распространяется от поверхности вглубь бетона, а не протекает равномерно по объему: у поверхности усадка максимальна. Усадка наиболее интенсивно проявляется в начальный период твердения бетона и в течение первого года. По мере высыхания бетона уменьшается влажностный градиент, растущие кристаллические сростки создают в дальнейшем большее сопротивление внутреннему давлению и деформации усадки постепенно исчезают.

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила представить значения относительных деформаций усадки в зависимости от основных влияющих факторов – расхода воды и цемента. Общеизвестно, что чем больше в бетоне цемента, тем больше усадка. Однако на величину усадки оказывает влияние не только количество цемента, но и объем цементного теста, т.е. водоцементное отношение (В/Ц), с увеличением которого усадка увеличивается и наоборот. Опытные данные, полученные с разного рода цементами, показывают наибольшую величину усадки около 3 мм на 1 пог. м для чистого цемента (цементного камня) в возрасте 5 лет, а для цементно-песчаной смеси в пропорции 1:3 – примерно от 1/3 до 1/2 усадки чистого цемента. Для бетонов величина годичной усадки выражается величиной примерно 0,2–0,4 мм на 1 пог. м.

Различные гидравлические добавки увеличивают усадку. В частности, увеличивает усадку и добавка ускорителя твердения (хлористого кальция).

Само явление усадки бетона не имеет еще в полной мере обоснованного объяснения ввиду сложного процесса твердения цемента и множества сопутствующих факторов.

Наиболее удовлетворительное объяснение усадки дают две теории, сущность которых заключается в следующем.

По первой теории [1] явление усадки ставится в зависимость от физико-химических процессов, сопровождающихся схватыванием цементного теста и твердением цементного камня. При этом одной из главных причин служит то, что цементное тесто, представляющее собой вначале студнеобразную массу (гель), в результате испарения избыточной воды, а отчасти и поглощением воды зернами цемента, вступающими в реакцию, постепенно обезвоживается и уплотняется. К этому присоединяется еще и влияние процесса кристаллообразования: кристаллы пронизывают массу геля и, срастаясь между собой, создают твердый скелет (сросток) цементного камня. Совместное влияние этих процессов и вызывает в цементном камне объемные изменения, называемое усадкой. Интенсивность усадки в начале процесса зависит от скорости гидратации цемента и количества воды, взятой для затворения цементного теста, в дальнейшем с уменьшением количества воды усадка протекает значительно медленнее.

Вторая теория [2] основана на свойствах капиллярности: поверхностное натяжение менисков, образующихся в смоченных водой порах, приводит к стягиванию стенок пор, что в результате и вызывает сжатие цементного камня. Так как микропоры распределены по всей массе бетона более или менее

равномерно в различных направлениях, то создаваемые капиллярными натяжениями давления взаимно уравновешиваются и производят как бы всестороннее сжатие бетона. В результате бетон получает объемную деформацию – усадку.

Следует отметить, что обе теории не исключают друг друга.

**Свободная усадка.** Свободной усадке цементного камня в начальный период твердения бетона препятствуют плотные заполнители, которые становятся внутренними связями, вызывающими в цементном камне начальные растягивающие напряжения [1]. По мере твердения геля образующиеся в нем кристаллические сrostки становятся такого же рода связями.

На величину усадки влияет зерновой состав заполнителей: при зернах разной крупности и меньшем объеме пустот усадка меньше. Всякие заполнители уменьшают усадку, причем имеет значение вид заполнителя. Усадка бетона, изготовленного на щебне, меньше, чем у бетона на гравии. Влияние заполнителя на уменьшение усадки тем меньше, чем меньше его способность к механическим деформациям, т.е. чем выше его модуль упругости. Величина усадки примерно обратно пропорциональна модулю упругости заполнителя.

Для бетонов на легких заполнителях это явление будет не столь выражено, чем для бетонов на плотных заполнителях, в связи с более низким значением модуля. По мере твердения геля кристаллические сrostки, образующиеся в легком бетоне, становятся такого же рода связями.

Следует отметить, что в конструкционных легких бетонах модуль упругости заполнителя обычно меньше модуля упругости цементного камня, поэтому напряжение в растворной части от усадки меньше напряжений в равнопрочном тяжелом бетоне. Одновременно усадка растворной части способна вызывать существенные напряжения в заполнителе. Например, для бетонов на граните при  $E = 16,8$  ГПа усадка составляет 0,49 мм/м; для бетонов на известняке при  $E = 7,1$  ГПа – 0,68 мм/м. Расчетный модуль упругости  $E_c$  для любого напряжения  $\sigma_c$  можно определить по приближенной зависимости, предложенной профессором Л.И. Онищенко, используя начальный модуль упругости  $E_0$ :

$$E_c = E_0 \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_0}{f_{cd}} \right).$$

Замечено, что усадка в бетонах с мелкозернистым пористым песком и пористым щебнем больше. У бетона на гранитном и известном щебне усадка меньше, чем у бетона на гравии или щебне из песчаника.

Необходимо отметить, что эти взаимодействия происходят в грубо неоднородной среде при разной величине зерен заполнителя, разных упругих свойствах цементного камня и заполнителей при наличии в цементном камне пор, а в бетоне – полостей, вызванных дефектами уплотнения. Поэтому величина и направление начальных напряжений усадки имеют случайный характер и подчиняются только статистическим закономерностям. В любом случае, начальные напряжения могут быть причиной микроразрушений в бетоне, причем микротрещины образуются преимущественно на поверхностях контакта заполнителей с цементным камнем.

Для керамзитобетона естественного твердения на кварцевом песке при продолжительности процесса 100 суток можно использовать формулу [3]

$$\varepsilon_{cs}(100) = 6,7 \times 10^{-6} (B\sqrt{D})^{1/2}.$$

Для описания процесса усадки во времени предлагается формула [3]

$$\varepsilon_{cs}(t) = \frac{4 \times t \times \varepsilon_{cs}(100)}{100 + 3 \times t},$$

где  $t$  – время, сут.

Для аналитического описания усадки бетона в любой момент времени можно воспользоваться эмпирической формулой [4]

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{cs,lim} \cdot (1 - e^{-\lambda_{cs} t}),$$

где  $\varepsilon_{cs,lim}$  – граничные деформации усадки (при  $t = \infty$ );

$\lambda_{cs}$  – опытный параметр, характеризующий скорость усадки, сут<sup>-1</sup>;

$t$  – время, сут.

Граничные значения относительных деформаций усадки определяются следующим образом [4]:

$$\varepsilon_{cs,lim} = \varepsilon_{cs,m} \cdot \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3,$$

где  $\varepsilon_{cs,m}$  – среднестатистическое значение  $\varepsilon_{cs,lim}$  для условий, принятых за среднее (сечение образца 100×100 мм; относительная влажность воздуха 70%, возраст, с которого начинается учет усадки, 7 суток);

$\xi_1, \xi_2, \xi_3$  – коэффициенты, учитывающие влияние отклонения реальных условий работы бетона от принятых средних для возраста бетона в начале высыхания, размеров образца, относительной влажности среды соответственно.

При наличии данных о дозировке составляющих можно воспользоваться формулой [4]

$$\varepsilon_{cs,m} = 0,14 \cdot 10^{-6} (w + a)^{3/2},$$

где  $w$  и  $a$  – количество воды в замесе по объему и вместимость привлеченного воздуха в уплотненной бетонной смеси, л/м<sup>3</sup> соответственно.

Первопричиной усадки цементного камня и, как следствие, бетона является уменьшение в геле количества свободной воды, которая расходуется на испарение и гидратацию цемента. Затем расходуется полусвязанная вода, которая окружает кристаллы гидросиликата кальция, что вызывает сближение этих кристаллов и дальнейшую усадку. Неравномерное высыхание бетона по объему приводит к неравномерной усадке, что в свою очередь ведет к возникновению неравномерных начальных усадочных напряжений. Открытые, быстро высыхающие поверхностные слои бетона испытывают растяжение, в то время как внутренние более влажные зоны, препятствующие усадке поверхностных слоев, оказываются сжатыми [1]. Свободная усадка способствует раскрытию трещин [5].

Существенное значение имеет также капиллярное давление в порах цементного камня. При контакте жидкости, находящейся в порах, со стенками капилляров силы притяжения, которые действуют между молекулами цементного скелета и жидкостью, заставляют ее подниматься по стенке капилляра, что приводит к искривлению поверхности жидкости – возникновению менисков (рисунок 1) [2]. Это создает капиллярное давление, которое сжимающе действует на стенки, ограничивающие жидкость.

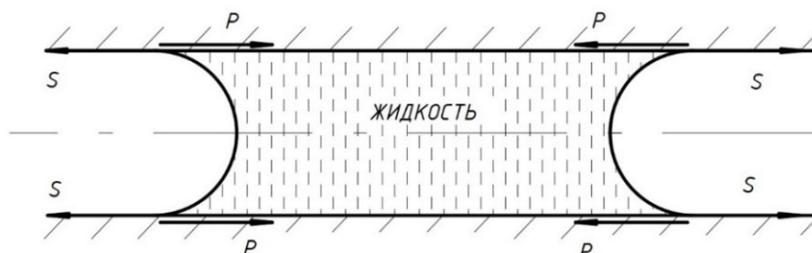


Рисунок 1. – Схема сил, обусловленных поверхностным натяжением менисков

Капиллярное давление в порах имеет довольно значительную величину и возрастает с уменьшением размеров пор. Поскольку микропоры в цементном камне расположены в разных направлениях, это давление взаимно уравнивается и действует как всестороннее сжатие, под влиянием которого также происходят объемные деформации.

Эти два фактора усадки зависят от интенсивности испарения, определяемого величиной влажностного перепада между бетоном и окружающей средой. Полная усадка цементного камня, высушенного до абсолютно сухого состояния, определяется только усадкой геля, поскольку усадка, вызываемая действием капиллярных сил, может полностью восстанавливать первоначальное положение.

Согласно положениям [6] полная усадка бетона состоит из двух частей – относительной деформации усадки при высыхании и относительной деформации аутогенной усадки:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca},$$

где  $\varepsilon_{cs}$  – полная относительная деформация усадки;

$\varepsilon_{cd}$  – относительная деформация бетона, обусловленная высыханием (испарение влаги);

$\varepsilon_{ca}$  – относительная деформация аутогенной усадки.

Конечное значение усадки при высыхании легкого бетона [6]:

$$\varepsilon_{cd} = \varepsilon_{cd,0} \cdot \eta_3 \leq k_h \cdot \varepsilon_{cd,0},$$

где  $\varepsilon_{cd,0}$  – номинальное значение усадки при высыхании, принимается по [6, таблица 3.2];

$\eta_3$  – коэффициент для определения усадки при высыхании;

$k_h$  – коэффициент, который зависит от приведенного размера сечения  $h_0$ .

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[ (220 + 110\alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \frac{f_{lcm}}{f_{cm0}}) \right] \cdot 10^{-6} \beta_{RH},$$

где  $\alpha_{ds1}$  и  $\alpha_{ds2}$  – коэффициенты, учитывающие вид цемента;  
 $f_{cm0} = 10$  МПа;  
 $f_{lcm}$  – средняя прочность легкого бетона на сжатие, МПа;

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right],$$

где  $RH$  – относительная влажность воздуха, %;  
 $RH_0 = 100\%$ .

Относительные деформации усадки во времени, обусловленные высыханием, определяется из выражения [6]

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0};$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}},$$

где  $t$  – возраст бетона на рассматриваемый период, сут;  
 $t_s$  – возраст бетона на начало усадки высыхания;  
 $h_0$  – приведенный размер поперечного сечения, мм.

Максимальные значения относительной деформации аутогенной усадки в легких бетонах определяется по формуле [6]

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) + \varepsilon_{ca}(\infty),$$

где  $\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{lck} - 10) \cdot 10^{-6}$ ;  
 $\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5})$ ;  
 $t$  – возраст бетона на рассматриваемый период, сут.

Если используется насыщенный водой (полностью или частично) легкий заполнитель (т.е. предварительно смоченный), значения аутогенной усадки будут значительно меньше.

**Стесненная усадка.** Усадка керамзитожелезобетонных конструкций зависит от класса легкого бетона, коэффициента армирования, свободной усадки бетона. Деформации усадки армированного образца ниже, чем неармированного, поскольку свободная усадка сдерживается арматурой, которая выполняет функцию внутренней связи (так как модуль упругости арматуры значительно выше модуля упругости керамзитобетона). Соответственно, чем выше коэффициент армирования, тем больше его влияние на усадку. Результаты исследований [7] показали уменьшение деформаций усадки в 2 раза при армировании бетонного образца по сравнению с эталонным неармированным образцом. При стесненной усадке в арматуре возникают сжимающие напряжения, а в бетоне – растягивающие.

Усадка цементного раствора в армированном бетоне первоначально сдерживается адсорбированной свободной водой в порах капилляров, а затем твердыми частицами: негидратированными частицами цемента, кристаллами гидроксида кальция, частично крупным заполнителем, а также арматурой [8].

В бетоне возникают растягивающие напряжения под влиянием разности свободной и стесненной усадки, причем наибольшие растягивающие напряжения возникают в местах контакта бетона с арматурой. Для определения теоретического влияния армирования на процесс усадки используются условие внутреннего равновесного состояния в любой момент времени и условие совместности деформаций [3]

$$\sigma_c(t) \cdot A_c = \sigma_s(t) \cdot A_s,$$

где  $\sigma_c(t)$  – напряжения в бетоне в момент времени  $t$ ;  
 $\sigma_s(t)$  – напряжения в арматуре в момент времени;  
 $A_c$  – площадь поперечного сечения бетона;  
 $A_s$  – площадь поперечного сечения арматуры.

$$\varepsilon_s(t) = \varepsilon_{cs}(t) - \varepsilon_c(t),$$

где  $\varepsilon_s(t)$  – деформации сжатия в арматуре;

$\varepsilon_c(t)$  – деформации растяжения в бетоне;

$\varepsilon_{cs}(t)$  – деформации свободной усадки бетона к моменту времени  $t$ .

Для определения деформаций свободной усадки армированного керамзитобетона в любой момент времени в [3] предложена формула

$$\bar{\varepsilon}_{cs}(t) = 4 \cdot t \cdot \varepsilon_{cs}(100) \cdot \frac{e^{-\frac{20 \cdot A_s}{A_c}}}{100 + 3 \cdot t},$$

где  $\varepsilon_{cs}(100)$  – свободная усадка бетона к моменту 100 суток.

В работах [7; 9] было изучено влияние симметричного и несимметричного армирования на усадку бетона с разным процентом армирования. Для определения деформаций усадки при несимметричном армировании авторы [9] использовали формулу

$$\varepsilon_{cs,RC} = \frac{\varepsilon_{cs}}{1 + \alpha_e \cdot \rho_s},$$

где  $\varepsilon_{cs,RC}$  – усадка армированного образца;

$\varepsilon_{cs}$  – свободная усадка бетона;

$\alpha_e$  – эффективное отношение модулей (отношение модуля упругости стали к модулю упругости бетона);

$\rho_s$  – процент армирования.

В работе [10] исследовались деформации усадки керамзитобетонных образцов с разным процентом армирования. Согласно полученным опытным данным, конечные величины деформаций усадки в нормальных температурно-влажностных условиях составили от 0,4 до 0,6‰.

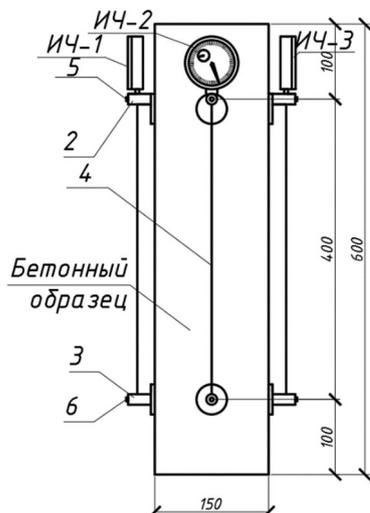
Начальные напряжения, возникающие вследствие усадки в керамзитобетоне, не учитываются при расчете армированных конструкций на прочность, хотя наличие данных напряжений может быть учтено применением коэффициента однородности [1; 7]. В преднапряженных конструкциях имеет место релаксация, которая способствует компенсации деформаций усадки.

**Программа экспериментальных исследований развития усадочных деформаций в керамзитобетоне и керамзитожелезобетоне.** С целью проведения экспериментальных исследований по изучению особенностей развития объемных усадочных деформаций в керамзитожелезобетоне составлена программа для эмпирического определения деформаций стесненной усадки армированного керамзитобетона.

Предполагается провести испытание опытных образцов в виде призм с размерами 150×150×600 мм, изготовленных из керамзитобетона классов LC16/18 – LC20/25, армированных продольной арматурой класса S500 и поперечной арматурой класса S240; продольные стержни диаметром 12, 14 и 16 мм.

Для каждой серии предусматривается 9 призмных образцов, из которых 3 образца предназначены для определения кратковременной призмной прочности керамзитобетона, 3 образца – для определения свободной усадки керамзитобетона и 3 образца – для определения стесненной усадки керамзитожелезобетона. Для определения кубиковой прочности предусмотрено изготовление 3-х образцов в виде кубов с длиной ребра 150 мм.

Деформации **свободной усадки** керамзитобетона планируется замерять посередине каждой грани испытываемого образца индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм и 0,002 мм, которые крепятся к образцам при помощи стальных реперов, соединенных стержнями базы (рисунок 2).



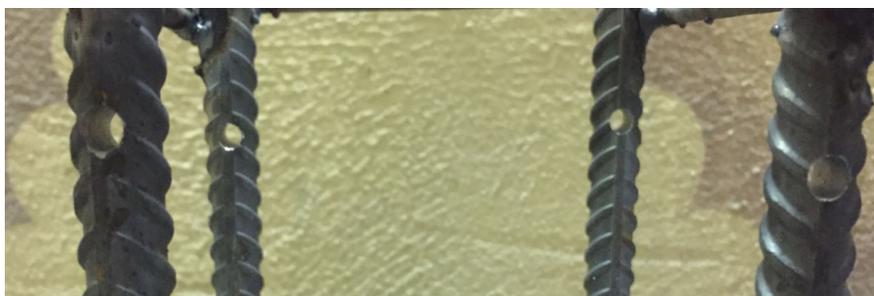
ИЧ-1, 2, 3 – индикаторы часового типа;  
2, 3 – стальной репер; 4 – стержень базы; 5, 6 – винт  
Рисунок 2. – Схема для измерения свободной усадки  
керамзитобетонного образца, оснащенного индикаторами  
часового типа

Для определения деформаций **стесненной усадки** в заводских условиях изготовлен сварной каркас, состоящий из продольной арматуры диаметром 12 мм, длиной 590 мм класса S500 и поперечной арматуры диаметром 6 мм, длиной 145 мм класса S240 (рисунок 3).



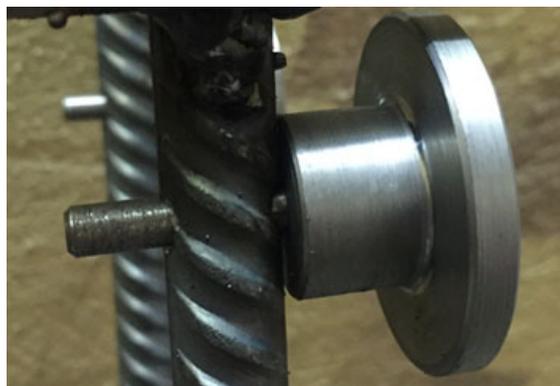
**Рисунок 3. – Арматурный каркас для измерения стесненной усадки**

В продольной арматуре выполнены отверстия по концам с двух сторон (рисунок 4).



**Рисунок 4. – Отверстия диаметром 5 мм в продольной арматуре**

В отверстия диаметром 5 мм вставляются стальные переходные штуцеры высотой 40 мм и диаметром основания 40 мм (рисунок 5).



**Рисунок 5. – Стальной переходной штуцер в продольной арматуре**

Полученный сварной каркас вставляется в стальные формы и обетонируется. После бетонирования к испытываемому образцу приклеиваются стальные реперы в местах, где располагаются стальные переходные штуцеры, а также между стальными переходными штуцерами на каждой грани образца. Приклеиваемая поверхность репера обезжиривается органическим растворителем. Стержень базы диаметром 2,5 мм устанавливается в отверстия стальных реперов и закручивается винтами. Стальные реперы соединяются между собой стержнями базы длиной 400 мм. Индикаторы часового типа устанавливаются в отверстия верхних стальных реперов. При помощи показаний индикаторов фиксируются деформации бетона и продольной арматуры (рисунок 6).

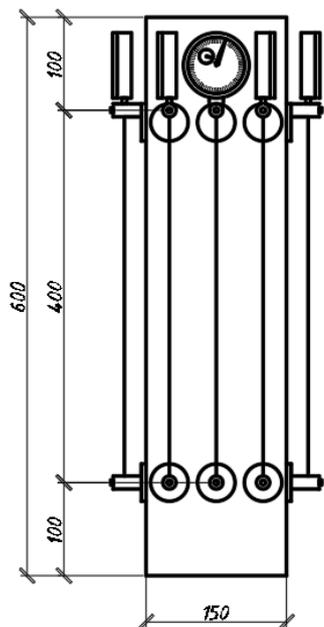


Рисунок 6. – Размещение индикаторов часового типа на опытном армированном образце

Деформации усадки можно рассматривать как сумму двух слагаемых: необратимых деформаций от старения геля, причем их постепенно затухающий рост может продолжаться в течение нескольких лет; обратимых деформаций, обуславливаемых капиллярными явлениями в микропорах благодаря наличию в них переменного количества свободной воды.

Обратимые деформации в зависимости от изменения влажности могут происходить и независимо от возраста бетона при всяком нарушении гидратического равновесия в микропорах. При этом знак деформации зависит от того, в какую сторону произошло изменение влажности.

Проведение запланированных экспериментальных исследований позволит выбрать теорию, наиболее точно описывающую процесс усадки в керамзитожелезобетоне, и усовершенствовать математическую модель расчета относительных деформаций стесненной усадки для керамзитобетонов, изготовленных на основе белорусских сырьевых материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мурашев, В.И. Железобетонные конструкции. Общий курс / В.И. Мурашев, Э.Е. Сигалов, В.Н. Байков – М. : Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. – 659 с.
2. Проектирование железобетонных конструкций : справочное пособие / А.Б. Голишев [и др.]. – Киев : Будівельник, 1985. – 496 с.
3. Бабич, Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях / Е.М. Бабич. – Киев : Вища Школа, 1988. – 207 с.
4. Голишев, О.Б. Курс лекцій з основ розрахунку конструкцій з опору залізобетону / О.Б. Голишев, А.Н. Бамбура. – Киев : Логос, 2004. – 340 с.
5. Коновалова, Б.В. К проблеме долговечности керамзитобетонных ограждающих конструкций гражданских зданий / Б.В. Коновалова // Информационная среда вуза : материалы X Междунар. науч.-техн. конф. – 2003. – С. 287–289.
6. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings: EN 1992-1-1-2004. – CEN, Brussels, 2004. – 225 p.

7. Бондаренко, В.М. Железобетонные и каменные конструкции / В.М. Бондаренко, Д.Г. Суворкин. – М. : Высшая школа, 1987. – 386 с.
8. Hobbs, D.W. Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete / D.W. Hobbs // ACI Structural Journal, 1974. – Pp. 445–450.
9. Al-Kamyani, Z. Predicting shrinkage induced curvature in plain and reinforced concrete / Z. Al-Kamyani, M. Guadagnini, K. Pilakoutas // Engineering Structures. – Vol. 176, 2018. – P. 468–480.
10. Кравченко, С.А. Экспериментальное исследование усадки, ползучести и потерь напряжения в арматуре элементов из керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем / С.А. Кравченко, А.А. Постернак // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 56. – С. 124–128.
11. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести : ГОСТ 24544-81\*. – Переиздание (ноябрь 1987 г.) с Изменением № 1 (введено в действие с 01.05.1985, утверждено 24.04.1985) ; введ. 01.01.1982. – М. : Госстандарт, 1980. – 26 с.
12. Pan, Z. Uncertainty analysis of creep and shrinkage effects in long-span continuous rigid frame of Sutong bridge / Z. Pan, C.C. Fu, Y. Jiang // Journal of Bridge Engineering. – Vol. 16 (2), 2011. – P. 248–258.
13. Maekawa, K. Long-term deformational simulation of PC bridges based on the thermo-hygro model of micro-pores in cementitious composites / K. Maekawa, N. Chijiwa, T. Ishida // Cement and Concrete Research, Vol. 41 (12), 2011. – Pp. 1310–1319.
14. Bažant, Z. P. Excessive long-time deflections of prestressed box girders. II: numerical analysis and lessons learned / Z. P. Bažant, Q. Yu, G-H. Li // Journal of Structural Engineering, Vol. 138 (6), 2012. – P. 687–696.
15. Bažant, Z.P. Excessive long-time deflections of prestressed box girders. I: record-span bridge in Palau and other paradigms / Z. P. Bažant, Q. Yu, G-H. Li // Journal of Structural Engineering. – Vol. 138 (6), 2012. – P. 676–687.
16. Huang, H. Effect of section geometry on development of shrinkage-induced deformations in box girder bridges / H. Huang, R. Garcia, M. Guadagnini, K. Pilakoutas // Materials and Structures. – Vol. 50, 2017. – P. 1–14.
17. Tanimura, M. Serviceability performance evaluation of RC flexural members improved by using low-shrinkage high-strength concrete / M. Tanimura, R. Sato, Y. Hiramatsu // Journal of Advanced Concrete Technology. – Vol. 5 (2), 2007. – P. 149–60.

Поступила 21.07.2020

## FEATURES OF DETERMINING RESTRICTED SHRINKAGE OF REINFORCED CLAYDITE-CONCRETE

*S. SEMENYUK, YU. MASKALKOVA, V. RZHEVUTSKAYA*

*The article presents an analytical review of native and foreign investigations of the free and restricted shrinkage features for concrete on dense and porous aggregates. Two different theories are considered, satisfactorily describe the shrinkage process and are not mutually exclusive. The issues related to the influence of aggregate components, cement, water-cement ratio and additives on shrinkage of claydite-concrete are highlighted. The proposals on accounting for shrinkage deformations in claydite-concrete and reinforced claydite-concrete are considered. The technique has been developed for specimens' investigations in the form of prisms reinforced with longitudinal nonprestressed reinforcement using indicating gage for measuring shrinkage strains. The suggested technique is required to more accurately determine the process of accumulation of volumetric shrinkage strains and improve the mathematical model for calculating the relative shrinkage strains in claydite-concrete and reinforced claydite-concrete.*

**Keywords:** *shrinkage, restricted shrinkage, claydite-concrete, reinforced claydite-concrete, volumetric deformations.*

УДК 665.634:66.061

**ДЕАРОМАТИЗАЦИЯ РАСТВОРИТЕЛЯ «УАЙТ-СПИРИТ» ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ  
В РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ СМАЗКАХ**

*д-р техн. наук, доц. П.И. ЮХНЕВСКИЙ*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск);  
**Н.Г. БУРСОВ, Н.П. ДИМИТРИАДИ**  
(РУП «Институт БелНИИС», Минск)

Приведены результаты исследований по деароматизации растворителя Нефрас С4-150/200 (заменитель уайт-спирита) для получения приемлемого запаха и применения в разделительных смазках при производстве бетонных и железобетонных изделий.

Обычный уайт-спирит имеет две составляющие запаха: от сернистых соединений и от ароматических. В статье задача модификации запаха этого растворителя до приемлемого уровня решается посредством связывания ароматических углеводородов при обработке растворителя 98%-й серной кислотой при +20 °С. Определено количество связанных углеводородов в зависимости от соотношения кислота/растворитель и продолжительности обработки. Разгонкой установлено содержание различных фракций углеводородов по температуре кипения и степень их сульфирования. Показано, что промышленный растворитель Нефрас С4-150/200 разделять на фракции по температуре кипения нецелесообразно, а следует подвергать сульфированию в исходном состоянии для получения приемлемого запаха.

**Ключевые слова:** уайт-спирит, деароматизация, фракционный состав, обработка серной кислотой.

**Введение.** На современном этапе развития технологии бетона и железобетона к разделительным смазкам предъявляются жесткие требования: помимо предотвращения прилипания бетона к поверхности строительных форм и образования стабильных смазочных слоев с хорошей адгезией, смазка должна выдерживать высокие удельные нагрузки, обладать низкой вязкостью, не стекать с вертикальных стенок, не оставлять жирных пятен на поверхности бетона. Кроме того, смазка должна быть биоразлагаемой и не загрязнять окружающую среду, не содержать летучих органических соединений, оказывающих вредное воздействие на работающий персонал. В Республике Беларусь с введением в эксплуатацию при реконструкции предприятий сборного железобетона современных технологических линий потребовалось применение новых разделительных смазок, удовлетворяющих большинству из перечисленных показателей [1].

Одной из основных причин, сдерживающих разработку и применение отечественных разделительных смазок, явилось отсутствие в Республике Беларусь производства низковязких растворителей, удовлетворяющих органолептическим показателям. Выпускаемые на ОАО «Нафтан» растворители имеют неприемлемый для смазок запах, обусловленный главным образом присутствием в их составе ароматических углеводородов. По комплексу остальных свойств (плотность, вязкость и др.) для использования в составе смазок наиболее подходящим является растворитель Нефрас С4-150/200 (заменитель уайт-спирита). Нефрас – собирательное название растворителей. Физико-химические свойства Нефрас-С4-150/200: плотность при 20 °С – не более 0,790 г/см<sup>3</sup>, начинает кипеть при температуре 140 °С, выкипает в пределах 98% при температуре не выше 215 °С, содержание серы – не более 0,25%, массовая доля ароматических углеводородов не должна превышать 19,5%.

Главным отличительным свойством уайт-спирита является его способность растворять органические соединения, отсюда и область его применения как растворителя в лакокрасочной промышленности. К главным его недостаткам относится большое количество ароматических составляющих, которые придают ему неприятный запах. Этот запах долго сохраняется, даже после высыхания окрашенной поверхности. В Советском Союзе активно применяли уайт-спирит, но более распространенным названием было Нефрас С4 155/200. При этом требования к растворителю были немного выше (массовая доля ароматических углеводородов не должна превышать 16%).

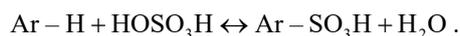
Точной химической формулы, описывающей молекулярное строение уайт-спирита, не существует. По химическому составу это смесь насыщенных алифатических (парафины, C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>), алициклических (нафтены, C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>) и ароматических (C<sub>n</sub>H<sub>2n-6</sub>) углеводородов с содержанием углерода n от 7 до 12. Неочищенный уайт-спирит обладает большей растворяющей способностью и лучше очищает поверхность от загрязнений, что достигается как раз за счет наличия в составе циклических и, в частности, ароматических углеводородов. Однако этот же продукт является ядовитым и опасным для здоровья человека.

Обычный уайт-спирит имеет две составляющие запаха: от сернистых соединений и от ароматических. Если первые еще можно убрать перекисью водорода, хлорной известью или прочими окислителями,

то вторые химически гораздо сложнее нейтрализовать. Основными способами деароматизации растворителей являются каталитическая гидроочистка (обработка паров очищаемого сырья водородом или водородсодержащим газом над катализатором), экстракционная (обычно диэтиленгликолем), адсорбционная (используют бентониты, активированные глины, цеолиты) и сернокислотная очистки [2–4].

Нами была поставлена задача модификации запаха этого растворителя до приемлемого уровня посредством удаления ароматических углеводородов. Для решения поставленной задачи мы использовали более высокую химическую активность серной кислоты к ароматическим углеводородам по сравнению с ее активностью к углеводородам линейного строения.

Для сульфирования ароматических углеводородов используются различные сульфорирующие агенты: серная кислота, олеум, серный ангидрид, хлорсульфоновая кислота и др. Введение сульфогруппы в ароматическое ядро с помощью серной кислоты может быть представлено в общем виде следующим уравнением:



Полагают, что электрофильным агентом при сульфировании концентрированной серной кислотой и моногидратом выступает молекула серного ангидрида  $\text{SO}_3$ .

Существенным отличием реакции сульфирования от других реакций электрофильного замещения является ее обратимость, при этом скорость обратной реакции – десульфирования – возрастает по мере снижения концентрации сульфорирующего агента. Вода, выделяющаяся при реакции, не только понижает концентрацию применяемой серной кислоты до предела, при котором сульфирование уже не только не происходит, но и вызывает обратную реакцию – гидролиз образующейся сульфокислоты.

С одной стороны, скорости сульфирования и десульфирования в определенной степени зависят от строения исходного ароматического соединения. Чем быстрее соединение сульфруется, тем легче десульфруется образовавшаяся сульфокислота. С другой стороны, скорость прямой реакции должна возрастать с увеличением концентрации сульфорирующего агента, а скорость десульфирования – с увеличением содержания воды в реакционной смеси. Следовательно, сместить равновесие вправо можно увеличивая количество и концентрацию серной кислоты, взятой для сульфирования, или же удаляя воду из реакционной смеси.

Одним из недостатков сульфирования серной кислотой является использование ее избытка, что приводит к необходимости затраты больших количеств нейтрализующих средств на стадии выделения продукта и образованию большего количества отходов, чем это необходимо по эквимолекулярной реакции.

Известно, что сульфирование ароматических углеводородов серной кислотой протекает в более мягких условиях по сравнению с линейными углеводородами и технически вполне осуществимо в производственных условиях по приготовлению разделительных смазок.

**Методика эксперимента.** Сернокислотную очистку большинства фракций углеводородов осуществляют не прибегая к предварительному подогреву, поскольку повышение температуры способствует полимеризации непредельных углеводородов [5]. Растворитель Нефрас С4-150/200 (далее Нефрас) сульфировали 98%-й серной кислотой при температуре +20 °С и непрерывном перемешивании. После отстаивания растворитель отделяли от так называемой «кислой смолки», образовавшихся сульфокислот и отработанной серной кислоты. Количество связанных ароматических углеводородов определяли по соотношению указанных компонентов (мас.%). После фильтрования полученного растворителя на щелочном фильтре запах оценивали органолептическим способом.

**Результаты** проведенных исследований по определению глубины деароматизации (очистки) растворителя приведены в таблице.

Определено, что допустимым является содержание остаточного количества ароматических углеводородов, равное не более 5% мас., предпочтительно от 1 до 2% мас. При незначительном содержании растворителя в готовом продукте (смазке) запах будет проявляться слабее, поэтому для составов таких смазок можно использовать растворители, подверженные более слабым условиям очистки.

Таблица. – Результаты деароматизации исходного растворителя Нефрас

Соотношение кислота/исходный растворитель	Кол-во связанных ароматических углеводородов, мас. %	Запах
0	0	Присутствует, средний
0,163	4,84	Присутствует, средний
0,501	11,27	Слабый
0,701	14,26	Слабый
1,014	15,13	Очень слабый
1,105	16,35	Очень слабый

В результате проведенных исследований установлено, что для удаления ароматических углеводородов из состава растворителя и получения приемлемого запаха отношение массы серной кислоты к массе исходного растворителя Нефрас должно быть в пределах от 0,6 до 1,2 при одностадийной очистке. При многостадийной очистке возможна экономия кислоты (порядка 50%).

Для уточнения технологических параметров обработки растворителя исследовали влияние продолжительности перемешивания на количество связанных ароматических углеводородов при соотношении кислота/растворитель, равном 0,67 (в пересчете на 100%-ю кислоту). Полученные результаты приведены на рисунках 1 и 2.

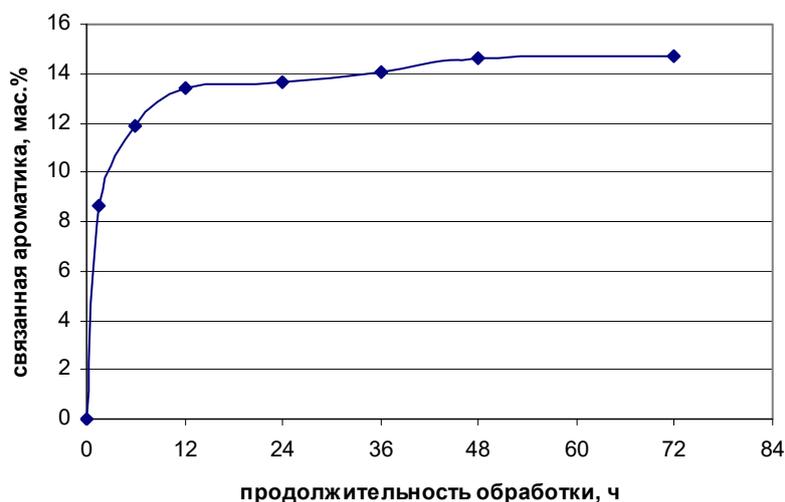


Рисунок 1. – Влияние продолжительности обработки растворителя Нефрас на количество связанных ароматических углеводородов

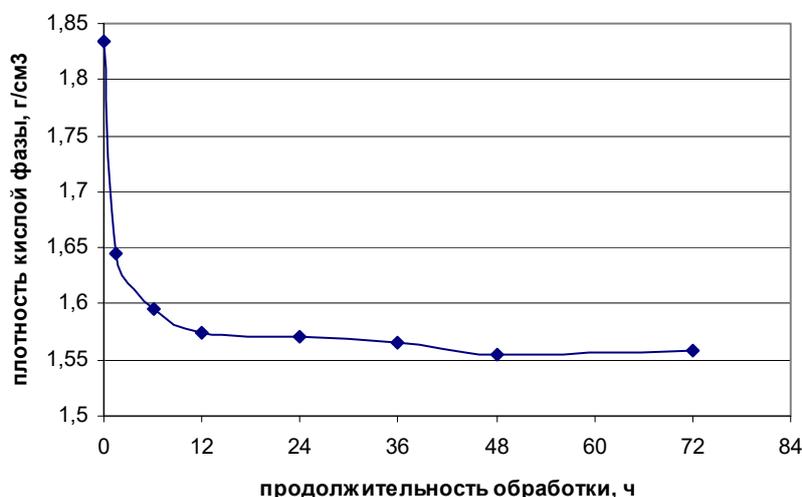


Рисунок 2. – Влияние продолжительности обработки растворителя на плотность кислой фазы

Как видно из полученных результатов (рисунки 1 и 2), с увеличением продолжительности сульфирования свыше 0,5 сут количество связанных ароматических углеводородов растет незначительно, из чего можно сделать вывод о нецелесообразности обработки более 2 сут. Это хорошо согласуется и с литературными данными [5].

Нами определено содержание ароматических углеводородов в разных фракциях растворителя, которые получали разгонкой исходного растворителя при атмосферном давлении в разных интервалах температур (рисунок 3). Установлено, что в растворителе Нефрас содержится небольшое количество (5–10%) низкокипящих фракций (150–170 °С) и высокое содержание (около 50%) высококипящей фракции (193–215 °С).

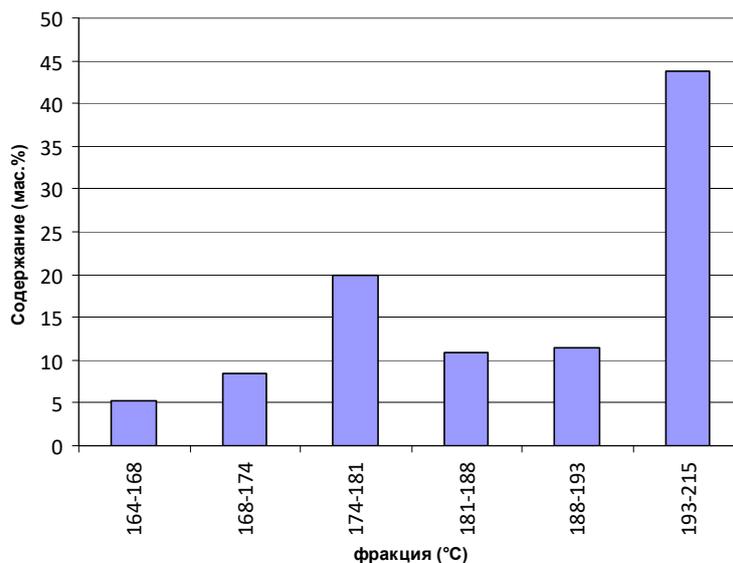


Рисунок 3. – Содержание различных фракций ароматических углеводородов в растворителе Нефрас

В дальнейших экспериментах исследовали сульфированность разных фракций растворителя. Установлено, что все фракции сульфируются достаточно хорошо, однако высококипящие фракции сульфируются более полно (рисунок 4) и после отделения сульфокислот приобретают нейтральный запах, приемлемый для использования в качестве компонента разделительных смазок.

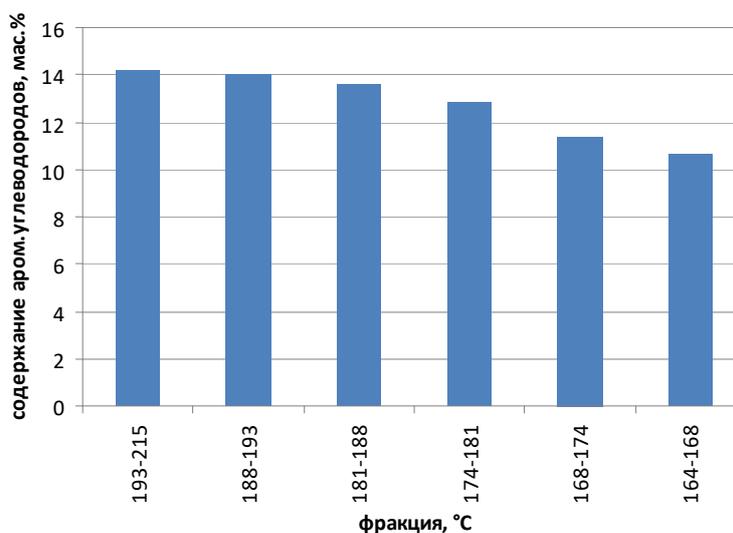


Рисунок 4. – Результаты определения содержания ароматических углеводородов в различных фракциях растворителя после обработки серной кислотой

**Заключение.** Для получения приемлемого запаха промышленный растворитель Нефрас С4-150/200 следует подвергать сульфированию серной кислотой в исходном состоянии, не разделяя на фракции по температуре кипения. Установлено, что технологический процесс сульфирования должен осуществляться по следующему режиму: соотношение в реакционной смеси, мас.%, растворителя Нефрас С4-150/200 и 98%-й серной кислоты в пределах от 1 : 0,6 до 1 : 1,2; температура смеси 20–25 °С; давление – атмосферное; смесь следует подвергать непрерывному перемешиванию в течение 12–48 часов. Материал реактора – полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), свинец, стекло или фторопласт.

В результате сульфокислотной очистки растворителя Нефрас С4-150/200 получаются две фазы. Верхняя фаза представляет собой деароматизированный растворитель, состоящий в основном из линейных углеводородов, пригодный для использования в составах низковязких разделительных смазок, а нижняя фаза состоит из смеси сульфокислот ароматических углеводородов и разбавленной серной кислоты.

Сульфокислоты выделяют из смеси обычно в виде солей. В качестве нейтрализующих компонентов используют кальцинированную соду, сульфит натрия, мел и известь. Результаты уже выполненных исследований показывают, что полученные сульфокислоты можно использовать для получения технических моющих средств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Синтез низковязких разделительных смазок на основе отечественных растворителей и масел с улучшенными органолептическими показателями / Н.Г. Бурсов [и др.] // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. трудов / Ин-т БелНИИС. – Минск, 2017. – Вып. 9. – С. 32–41.
2. Разработка технологии деароматизации растворителя «Уайт-спирит» / О.А. Казанцев [и др.] // Будущее технической науки : сб. материалов XIII Междунар. мол. науч.-техн. конф. / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2014. – С. 501.
3. Романков, П.Г. Процессы жидкостной экстракции и хемосорбции / П.Г. Романков // Труды II Всесоюз. науч.-техн. совещания (окт. 1964 г.). – Москва – Ленинград : Химия. [Ленингр. отделение], 1966. – 376 с.
4. Леонова, М.В. Сульфирование : практикум / М.В. Леонова. – Самара : СамГТУ, 2005. – 57 с.
5. Проскуряков, В.А. Химия нефти и газа / В.А. Проскуряков, А.Е. Дробкин / СПб. : Химия. – 1995. – 447 с.

Поступила 18.05.2020

#### WHITE SPIRIT SOLVENT DEAROMATIZATION FOR USE IN RELEASE AGENTS

**P.I. YUKHNEVSKY, N.G. BURSOV, N.P. DIMITRIADI**

*The results of studies on the dearomatization of solvent Nefras C4-150/200 (a substitute for white spirit) are given to obtain an acceptable odor and use in release agents in the production of concrete and reinforced concrete products.*

*Normal white spirit has two components of smell: from sulfur compounds and from aromatic compounds. The problem of modifying the odor of this solvent to an acceptable level in the article is solved by linking aromatic hydrocarbons by treating the solvent with 98% sulfuric acid at plus 20 °C. The amount of bound hydrocarbons was determined depending on the ratio of acid / solvent and the duration of the treatment. By distillation, the content of various fractions of hydrocarbons at the boiling point and the degree of sulfonation were established. It is shown that the industrial solvent Nefras C4-150/200 is not advisable to separate into fractions by boiling point, but should be subjected to sulfonation in the initial state to obtain an acceptable odor.*

**Keywords:** white spirit, dearomatization, fractional composition, sulfuric acid treatment.

УДК 621.926

**КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ  
МЕЛОВЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ КОМПОЗИТОВ МОКРЫМ СПОСОБОМ**

*канд. техн. наук В.И. КОЗЛОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. О.А. ПЕТРОВ,  
канд. техн. наук Д.Н. БОРОВСКИЙ  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)*

*Проведен анализ существующих способов получения тонкодисперсного мела. Показано, что наиболее экономичным является механическое измельчение карбоната кальция. В работе исследуется процесс диспергирования мела в вертикальных бисерных мельницах с дополнительными физическими эффектами – гидродинамической кавитацией и ультразвуком. Представлены результаты экспериментальных исследований по измельчению при различных сочетаниях физических эффектов. Получены и представлены в виде уравнений эмпирические зависимости для расчета эффективности диспергирования.*

**Ключевые слова:** бисерная мельница, диспергирование, мел, мешалка, гидродинамическая кавитация, ультразвук, эффективность, суспензия, фракционный состав.

**Введение.** Очевидно, в качестве материалов будущего выделяются композиционные или композитные материалы (композиты), состоящие из основы (матрицы или матриц) и наполнителей. Варьируя состав, удастся получать материалы и изделия на их основе, на порядок превышающие традиционные по физико-механическим свойствам.

В составе композитов, в зависимости от их назначения, используются наполнители с различными характеристиками, химическим составом и происхождением: как искусственные, так и природные, органические и минеральные, вводимые для придания изделиям и конструкциям определенных эксплуатационных свойств в совокупности с экономической выгодой и экологической безопасностью.

Ключевым требованием к наполнителям является их тонкодисперсность, приводящая к появлению новых композиционных материалов с характеристиками, отличными от характеристик отдельных компонентов, с требуемым набором полезных свойств.

Одним из самых распространенных минералов на Земле является карбонат кальция (кальцит), который после соответствующей обработки широко используется в качестве наполнителя в виде тонкодисперсного мела с размером частиц от 1 до 10 мкм. Мел применяется для производства строительных материалов, стекла, лакокрасочных изделий, клеев, пластмасс, резин, бумаги, косметики, медпрепаратов, бытовой химии, используется в сельском хозяйстве и пищевой промышленности.

Основными мировыми производителями тонкодисперсного мела являются США, Китай, Франция, Испания, Англия, Бельгия и Россия. Добыча мела и мергеля активно ведется и в Беларуси на площадях их неглубокого залегания, главным образом, в Кричевском, Климовичском, Костюковичском и Чериковском районах Могилевской области; в Гродненском и Волковысском районах разведан целый ряд месторождений. Суммарные запасы этого полезного ископаемого в нашей стране оцениваются примерно в 270 млн т [1].

**Основная часть.** В основном тонкодисперсный мел производится двумя способами: конденсационным (химическое осаждение карбоната кальция) и путем измельчения крупных кусков пород и осадочных отложений до частиц нужных размеров (природный или натуральный карбонат кальция) [2].

Конденсационный способ позволяет получать тонкодисперсный мел с наименьшим размером частиц, однако он имеет небольшую производительность, поэтому в промышленности нашел применение более простой и экономичный способ – механическое измельчение, которое подразделяется на сухое, полусухое и мокрое.

Мокрый способ измельчения хоть и является более энергозатратным, чем сухой и полусухой, однако он позволяет получать частицы мела меньшего размера, которые имеют гладкую и круглую форму, что способствует уменьшению износа оборудования.

Основными стадиями мокрого способа получения тонкодисперсного мела являются дробление сырья, магнитное сепарирование, мокрое размучивание, тонкое измельчение в диспергаторе, сбор суспензии с введением диспергатора, обогащение в гидроциклонах, вторичное тонкое измельчение, контрольный отсев, сушка в распылительной сушилке [2].

В качестве диспергирующего оборудования раньше в основном использовали струйные дезинтеграторы, однако сейчас предпочтение отдается вертикальным бисерным мельницам. Они хоть и обладают меньшей производительностью, но сразу позволяют получать продукт нужного размера и избегать вторичного тонкого измельчения [2].

Бисерная мельница представляет собой вертикальный цилиндрический корпус, внутри которого располагается мешалка с дисками. В качестве измельчающих тел используют керамический бисер с размером частиц 0,5–3,0 мм, который заполняет рабочее пространство на 85–90%. При вращении происходит перемещение бисера и измельчение подаваемой суспензии.

В бисерных мельницах материал разрушается в основном за счет истирания с добавлением поверхностно-активных веществ для предотвращения агломерации.

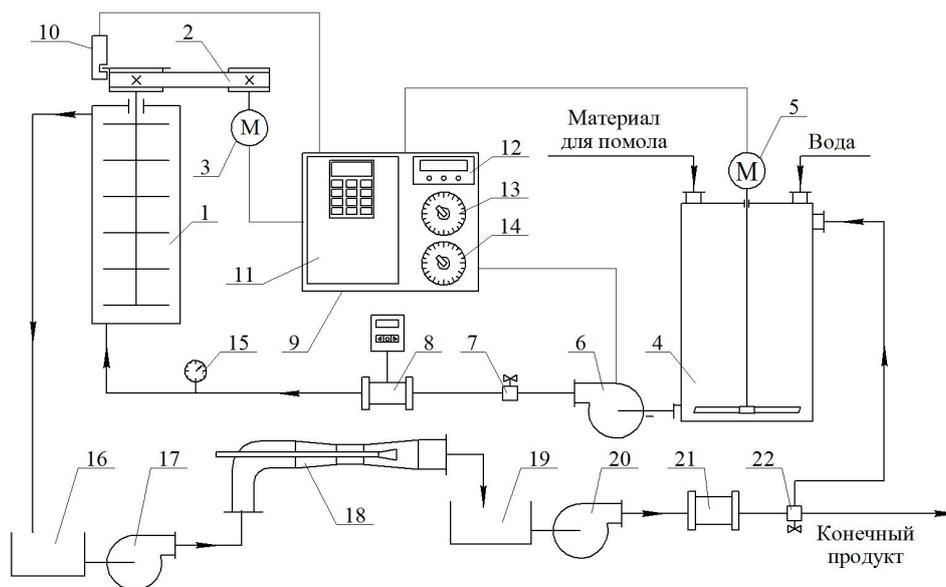
Основная цель при диспергировании мела – получить частицы материала как можно меньшего граничного размера. Проведенные нами исследования показали, что основными факторами, влияющими на это, являются скорость подачи суспензии, размер мелющих тел и частота вращения мешалки. Однако увеличение частоты вращения приводит к более интенсивному износу дисков и подшипников. Снижение подачи суспензии понижает производительность, а уменьшение размера мелющих тел ведет к увеличению затрат мощности на перемешивание [3]. Поэтому в современной практике для уменьшения граничного размера частиц измельченного материала вместе с механическим разрушением применяют физические явления, интенсифицирующие процесс. При гидродинамической обработке к таким явлениям в первую очередь можно отнести кавитацию и ультразвук [4].

Анализ диспергационных методов и предъявляемых к ним требований позволил сконструировать и изготовить лабораторные установки (рисунок 1), которые в совокупности позволяют изучить комплексное воздействие на измельчаемый материал. Основным агрегатом является вертикальная бисерная мельница (ВБМ) 1, а вспомогательными – статический кавитатор (СК) 18 и ультразвуковой диспергатор (УД) 21.

В качестве измельчаемого материала использовался мел с размером частиц 200–500 мкм, который смешивался с водой для получения суспензии в объемном соотношении 1 : 2.

Частота вращения мешалки ВБМ составляла 1050 об/мин, что соответствовало линейной скорости по кромкам дисков 10 м/с. Подача исходного продукта, обеспечивающая изменение скорости суспензии на полное сечение мельницы, составляла 0,097 м/с. В качестве измельчающих тел применялись чугунные шарики диаметром 0,5 мм, которыми заполняли рабочую камеру на 90–95% [5].

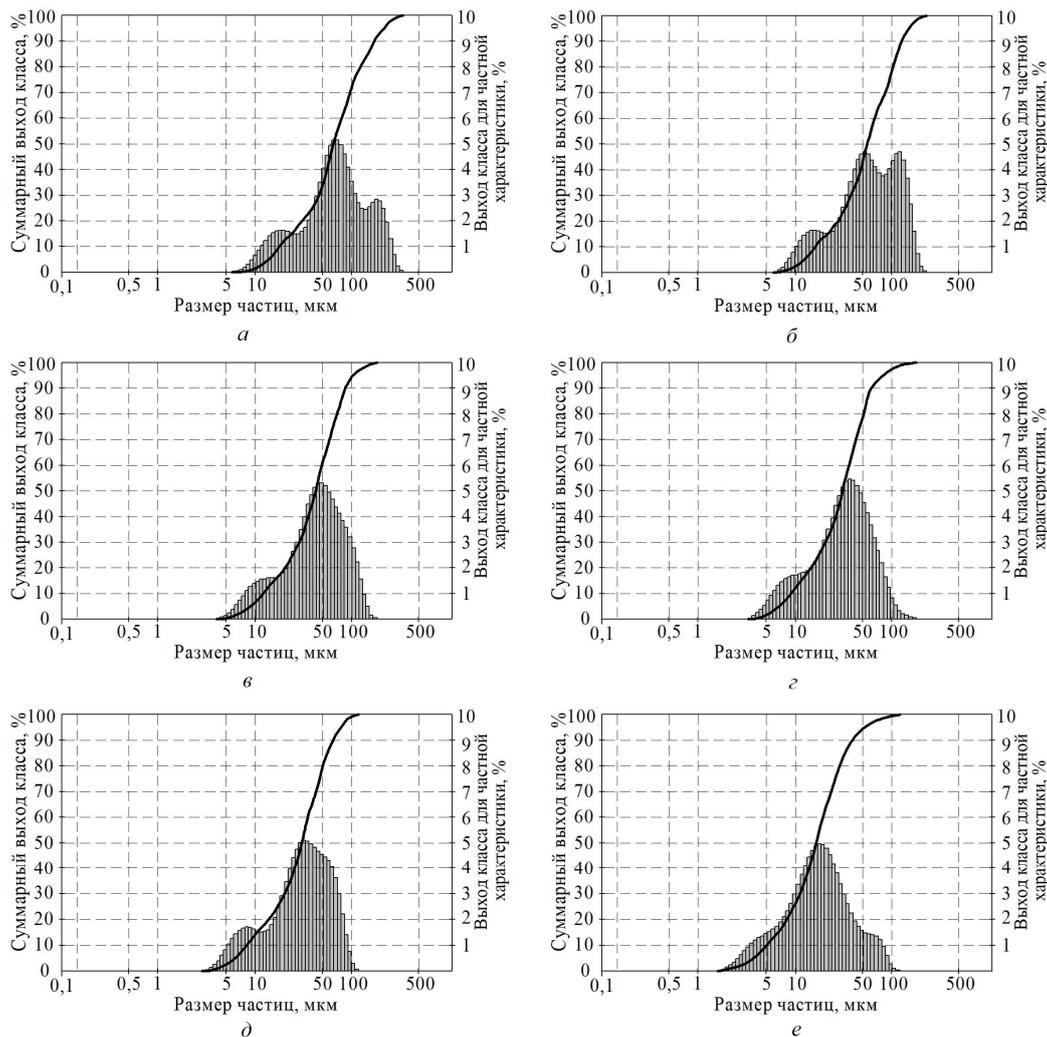
Для оптимальной работы СК скорость суспензии в горловине трубы Вентури составляла около 10 м/с [6], а УД работал с частотой 22 кГц.



1 – вертикальная бисерная мельница; 2 – ременная передача; 3, 5 – электродвигатель; 4 – емкость с мешалкой для приготовления суспензии; 6 – насос для подачи суспензии в мельницу; 7, 22 – кран; 8 – электромагнитный расходомер; 9 – пульт управления; 10 – считывающая головка тахометра; 11 – частотный преобразователь; 12 – тахометр; 13, 14 – автотрансформаторы; 15 – манометр; 16 – промежуточная емкость струйного кавитатора; 17 – насос струйного кавитатора; 18 – струйный кавитатор; 19 – промежуточная емкость ультразвукового диспергатора; 20 – насос ультразвукового диспергатора; 21 – ультразвуковой диспергатор

Рисунок 1. – Схема лабораторной установки

На начальных этапах исследований основной целью было получение данных об изменении размера частиц материала в зависимости от количества проходов суспензии через каждый агрегат в отдельности. В результате были получены характеристики крупности распределения размеров частиц. В качестве примера на рисунке 2 приведены такие характеристики для СК. Их анализ показал, что в пробах наблюдается полидисперсный продукт с несколькими преобладающими диапазонами частиц, которые с увеличением числа проходов смещаются влево, т.е. происходит доизмельчение крупной фракции. За шесть проходов через ВБМ максимальный размер частиц в пробе составлял 4 мкм, через СК – 100 мкм, а через УД – 40 мкм. Также стоит отметить, что в основном процесс измельчения происходил за первые 2–3 прохода, далее максимальный размер менялся незначительно, но происходило доизмельчение крупной фракции [7].

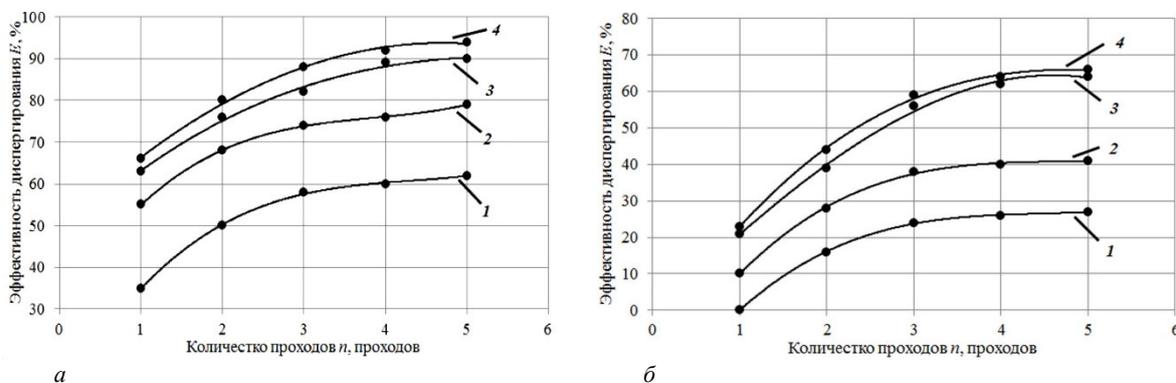


*a* – 1; *б* – 2; *в* – 3; *г* – 4; *д* – 5; *е* – 6

**Рисунок 2. – Характеристики крупности распределения размеров частиц мела в зависимости от количества проходов через СК**

Как и в предыдущей работе [8] за критерий эффективности  $E$  была принята доля конечного продукта меньше заданного граничного размера, в данном случае 0,1 и 1 мкм, что соответствует сверхтонкому помолу.

Далее были проведены экспериментальные исследования на комплексе лабораторных установок. Результаты представлены на рисунке 3 в виде функциональных зависимостей  $E=f(x_i)$ , где  $x_i$  – граничный размер.



*a* – граничный размер 1 мкм; *б* – граничный размер 0,1 мкм;  
1 – ВБМ; 2 – ВБМ и СК; 3 – ВБМ и УД; 4 – ВБМ, СК и УД

**Рисунок 3. – Зависимость эффективности диспергирования от количества проходов материала**

По экспериментальным зависимостям видно, что в случае использования ВБМ за первые три прохода показатель эффективности диспергирования резко возрастает: на 55–75% для граничного размера 1 мкм и на 25–40% – для 0,1 мкм. Дальнейшее увеличение числа проходов с 3 до 5 приводит к незначительному повышению эффективности на 5%.

Дополнительное воздействие кавитации привело к увеличению эффективности на 15–20% для граничного размера 1 мкм и на 10–20% – для 0,1 мкм. Также следует отметить, что даже за первый проход в измельченном продукте наблюдается фракция менее 0,1 мкм в количестве 10%, а оптимальное количество проходов составляет три.

Что касается воздействия ультразвука, то он способствовал увеличению эффективности на 25–30% для граничного размера 1 мкм и на 20–35% – для 0,1 мкм. За первый проход получена фракция менее 0,1 мкм в размере 20%. Кроме того, по сравнению с гидродинамической кавитацией, ультразвук позволил повысить эффективность на 10–15%, а эффективность диспергирования в этом случае возрастает на протяжении первых 4-х проходов (циклов).

При совместном использовании ВБМ, СК и УД эффективность диспергирования возросла, однако ее значения оказались всего на 3–5% выше, чем при применении ВБМ и УД.

Обработка экспериментальных данных дала возможность получить эмпирические зависимости для расчета эффективности диспергирования. Они представлены в виде следующих уравнений:

1) для граничного размера 1 мкм

$$\begin{cases} E = 0,5833n^3 - 7,5357n^2 + 33,881n + 8, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ}, \\ E = 0,6667n^3 - 7,7143n^2 + 31,619n + 30,4, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ и СК}, \\ E = 0,0833n^3 - 2,3929n^2 + 18,524n + 47, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ и УД}, \\ E = -2n^2 + 18,8n + 49,6, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ, СК и УД}; \end{cases} \quad (1)$$

2) для граничного размера 0,1 мкм

$$\begin{cases} E = 0,5833n^3 - 7,8214n^2 + 35,595n - 28,4, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ}, \\ E = 0,2917n^4 - 2,9167n^3 + 6,2083n^2 + 15,417n - 9, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ и СК}, \\ E = -3,0714n^2 + 29,329n - 5,8, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ и УД}, \\ E = 0,25n^3 - 5,6786n^2 + 37,071n - 8,8, & \text{при } 0 \leq n \leq 5 - \text{БМ, СК и УД}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $n$  – количество проходов.

Расхождение экспериментальных и рассчитанных по уравнениям (1) и (2) значений эффективности измельчения не превышает 2,0%.

**Заключение.** В результате экспериментальных исследований было установлено, что использование импульсного механического воздействия на измельчаемый материал в вертикальной бисерной мельнице совместно с гидродинамической кавитацией и ультразвуком, которые были реализованы с помощью статического кавитатора и ультразвукового диспергатора, включенных в единый циркуляционный контур, позволило значительно повысить эффективность диспергирования меловой суспензии. Так, количество частиц с размером менее 0,1 мкм увеличилось на 20–35%. Причем, использование ультразвукового диспергатора привело к возрастанию эффективности на 10–20%, а применение простейшего статического кавитатора дало прирост около 5–10%.

В дальнейшем планируется продолжить исследования в направлении оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик рассматриваемого оборудования, его численного моделирования, а также расширить область применения таких комплексных гидродинамических установок в различных технологиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор рынка карбоната кальция природного тонкодисперсного // ИнфоМайн. – 2016. – Изд. 3. – 176 с.
2. Козловский, В.И. Использование шаровых мельниц с мешалками для сверхтонкой микронизации в производстве тонкодисперсного мела / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы их развития : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–29 февр. 2013 г. / Белорус. гос. технолог. ун-т. – Минск, 2013. – С. 47–50.
3. Козловский, В.И. Определение энергозатрат на вращение рабочего органа шаровой мельницы с мешалкой / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 5–6. – С. 14–17.
4. Козловский, В.И. Дисперсионные методы получения тонкодисперсных материалов / В.И. Козловский, О.А. Петров – Химическая технология и техника : материалы 83-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и асп. (с международным участием), Минск, 4–14 февраля 2019 г. / отв. за издание И.В. Войтов; УО БГТУ. – Минск: БГТУ, 2019. – 56 с.

5. Козловский, В.И. Применение шаровой мельницы с мешалкой для тонкого диспергирования материалов / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович // Химическая технология и техника : тезисы 78-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и асп. (с международным участием), Минск, 3–10 февр. 2014 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2014. – С. 51.
6. Петров, О.А. Исследование и моделирование гидродинамических кавитаторов / О.А. Петров, П.Е. Вайтехович // Химическая промышленность сегодня. – 2003. – № 12 – С. 52–56.
7. Козловский, В.И. Изучение влияния ультразвука и кавитации в комплексе с бисерной мельницей на диспергируемый материал / В.И. Козловский, О.А. Петров, Я.А. Потоцкий – Химическая технология и техника : материалы 84-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и асп. (с международным участием), Минск, 3–14 февр. 2020 г. / отв. за издание И.В. Войтов ; УО БГТУ. – Минск : БГТУ, 2020. – С. 159–161.
8. Козловский, В.И. Влияние размера мелющих тел на эффективность диспергирования материала в шаровой мельнице с мешалкой / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович, Т.В. Камлюк // Труды БГТУ. – 2016. – № 3 : Химия и технология неорганических веществ. – С. 136–141.

Поступила 28.08.2020

## COMPLEX TECHNOLOGY OF DISPERSING CHALK FILLERS OF COMPOSITES WET METHOD

**V. KOZLOUSKIY, O. PETROV, D. BOROVSKIY**

*The analysis of methods of obtaining finely dispersed chalk in the world is carried out. It has been shown that the most economical is the mechanical grinding of calcium carbonate. The paper investigates the process of chalk dispersion in vertical bead mills with additional physical effects - hydrodynamic cavitation and ultrasound. The results of experimental research on grinding with various combinations of physical effects are presented. Empirical dependencies for calculating the efficiency of dispersion are obtained, which are presented in the form of equations.*

**Keywords:** *Bead mill, dispersion, chalk, stirrer, hydrodynamic cavitation, ultrasound, efficiency, suspension, fractional composition.*

УДК 697.1:536.2

## РЕКУПЕРАЦИЯ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

*канд. техн. наук, доц. Д.Н. ШАБАНОВ, Е.Г. БРЯНЦЕВ, И.В. КРУПЕНЧИК  
(Полоцкий государственный университет)*

*Проанализированы используемые в настоящее время методы теплоизоляции зданий. Исследован с применением технологии 3D-печати инновационный метод повышения энергоэффективности ограждающих стен, основанный на применении конструктивно новых ограждающих конструкций с рекуперацией выходящего теплового потока.*

**Ключевые слова:** *сопротивление теплопередаче, удельные единовременные затраты, окупаемость, тепловая инерционность.*

**Введение.** Повышение энергоэффективности жилых зданий, продиктованное энергетическим кризисом, потребовало значительного увеличения нормативных требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций этих зданий и разработки комплекса энергосберегающих мероприятий.

На сегодняшний день в Республике Беларусь освоено производство отопительных приборов из стали и алюминия, биметаллических отопительных приборов, а также продолжается выпуск усовершенствованных чугунных радиаторов.

Альтернативой традиционным радиаторам и конвекторам могут стать бетонные отопительные приборы. Бетон является прекрасным строительным материалом, позволяющим использовать его для изготовления почти всех элементов здания, в том числе отопительных устройств – нагревательных приборов, выполненных в виде тонких лучистых плит.

**Анализ предварительных исследований.** К новым эффективным теплоизоляционным материалам нового поколения относятся вакуумированные плиты. Теплоизолирующие свойства и продолжительность жизни вакуумной изоляционной панели определяются технологическими и конструктивными факторами: свойствами наполнителя, начальным уровнем вакуума в панели, проницаемостью оболочки, количеством и эффективностью поглотителя остатков газа, размером и толщиной панели, условиями ее работы, способом крепления, методами защиты. Вакуумированная теплоизоляционная панель состоит из пористого материалонаполнителя, помещенного в непроницаемую оболочку. Воздух из панели откачивается до давления от 0,1 до 100 Па, после чего оболочка герметизируется.

Как и к другим материалам, к вакуумированным теплоизоляционным панелям предъявляются особые требования. Для такого типа панелей обязательным является условие сохранения герметичности. Оболочки для панелей рекомендуется выполнять из нескольких слоев, один из них содержит очень тонкую металлическую пленку (алюминий), на которую для придания механической прочности с обеих сторон нанесен слой пластика.

Чтобы сформировать оболочку (пакет) для наполнителя, пленка заваривается по краям. Тонкий слой пластика с низкой температурой плавления обычно наносится на внутреннюю поверхность пленки, после чего она может быть заварена под воздействием температуры и 3 давления. Проницаемость сварных соединений пластика для газа и влаги гораздо выше, чем проницаемость остальной поверхности оболочки. Для минимизации этого отрицательного эффекта предлагается уменьшить толщину сварного соединения и увеличить его ширину. Данный теплоизоляционный материал позволяет значительно уменьшить толщину слоя утеплителя, повышая при этом сопротивление ограждающей конструкции теплопередаче

В патенте № 2398078 представлена трехслойная железобетонная панель, состоящая из теплоизоляционного слоя, внутреннего и наружного железобетонного слоя, которые связаны между собой армированными бетонными шпонками, проходящими через теплоизоляционный слой. Армированные бетонные ребра имеют площадь, которая определяется из соотношения толщины среднего слоя, площади панели, коэффициентов теплопроводности, материалов арматуры, утеплителя, слоев панели и требуемого сопротивления теплопередаче.

Известен патент № 2156340, в котором представлена строительная сэндвич-панель, предназначенная для возведения стен и кровли сооружений. Она представляет собой каркас, выполненный из алюминиевых и стальных профилированных листов и слоев утеплителя из минеральной ваты или пенопласта на основе полистирола, расположенного между ними. Эта конструкция позволяет исключить вредные (токсичные) выделения из компонентов утеплителя и повысить огнестойкость панели.

В патенте № 2372454 предлагается создать надежную конструкцию стены с повышенной газо- и теплостойкостью, не применяя дополнительные конструктивные элементы. Теплоизоляционная панель состоит из двух поверхностных слоев, представленных металлическими листами, между которыми расположены теплоизоляционные материалы, 4 состоящие из блоков пеностекла, уложенных с перевязкой швов и соединенных между собой клеящим композитом. Торцевые поверхности зеркально смещены относительно друг друга и образуют замковый вид «шип-паз», позволяющий соединять панели одного типа между собой.

Патент № 106715 представляет вакуумированную теплоизоляционную панель с гибкой оболочкой и с размещенным внутри наполнителем из многослойного теплоизоляционного материала: алюминиевой фольги, бумаги и пластика, нарезанного на куски размером до 10 мм. Панель изготовлена путем горячего прессования под давлением.

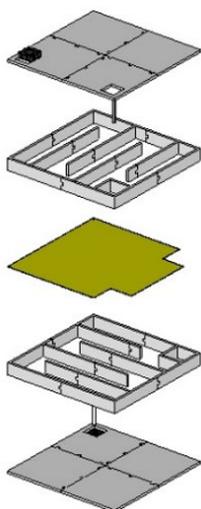
Сегодня кроме конвекции и теплопроводности, в рассматриваемой системе имеет место и радиационный перенос теплоты, особенно в случае применения отопительных приборов со значимой долей теплоотдачи излучением (система «Плэн»). Радиационный теплообмен может существенно влиять на характер распределения параметров микроклимата. В связи с тем, что воздух является смесью, состоящей преимущественно из двух атомных газов, он не представляет преграды для теплового излучения, т.е. является диатермичным. Можно принять также, что тела в помещении образуют замкнутую систему серых поверхностей, которые диффузно излучают и отражают. Серыми поверхностями можно считать все поверхности, если в системе распространяется практически однородное по спектральному составу излучение, т.е. когда одновременно не рассматривается излучение от высокотемпературных источников (солнца) и тел с обычной комнатной температурой. Диффузно отражающими в расчетах допустимо считать даже поверхности с ярко выраженными зеркальными свойствами, если на данные поверхности падает хаотично ориентированное излучение (система «воздух – фольга» в несколько слоев).

**Цель исследования.** Инновационным методом увеличения энергоэффективности ограждающих стен является применение конструктивно новых ограждающих конструкций с рекуперацией выходящего теплового потока. Применение данной конструкции возможно не только при новом строительстве, но и при реконструкции здания.

Доказательством энергоэффективности таких конструкций может стать опытная модель, напечатанная с помощью 3D-принтера. С помощью этой модели и опытной установки можно подтвердить или опровергнуть данную идею.

**Результаты исследования и их обсуждения.** Современные перспективы улучшения качества теплоизоляции связывают с использованием вакуумированных материалов и новыми конструктивными системами ограждающих конструкций.

Зимой помещения с большей теплонакопительной способностью при отключении отопления охлаждаются с меньшей скоростью, а летом избыточная энергия в дневное время может накапливаться для того, чтобы отдать ее в воздух помещения в прохладные ночные часы. Наиболее холодные и жаркие периоды года отмечены особенно резкими изменениями температуры и солнечной радиации. Эти периоды наибольшего охлаждения и наибольшего нагрева при проектировании ограждений и систем отопления являются экстремальными, поэтому основные теплотехнические расчеты должны выполняться с учетом нестационарности условий. Тепловая инерция также характеризует степень затухания амплитуды колебаний температуры наружного воздуха и влияние ее на амплитуду колебаний температуры воздуха внутри помещения. Чем больше теплонакопительная способность ограждающей конструкции, тем менее влиятельны колебания



**Рисунок 1. – Модель трехслойной стеновой конструкции**

наружного воздуха. При медленном понижении температуры, до начала периода резкого похолодания, распределение температуры в ограждении в каждый момент времени практически соответствует стационарному. В период резкого похолодания в каждый момент времени распределение температуры заметно отличается от стационарного.

Для проведения эксперимента была разработана модель с помощью программного обеспечения SketchUp и экспортирована в файл с расширением stl для дальнейшей печати на 3D-принтере.

Так как полностью модель не помещалась на печать она была разбита на 24 сегмента с длиной стороны не больше 13 см. В дальнейшем для того чтобы соединить все сегменты, были разработаны «замки» и направляющие (рисунок 1). Данная модель представляет два основных слоя, в которых каналы направлены перпендикулярно друг другу и разделены слоем алюминиевой фольги, являющейся теплоотражающим экраном. Верхний и нижний слой накрывается крышкой с отверстием под кулер.

Суть новой конструкции состоит в том, что приточный вентилятор всасывает наружный чистый воздух и заставляет его двигаться сквозь конструкцию ограждения (рисунок 2). Далее происходит охлаждение здания и нагретый воздух, уходящий из помещения, отдает тепло приходящему чистому воздуху, который в подогретом состоянии создает комфортную среду для пребывания людей (рисунок 3).

Исходя из этого, можно сделать выводы:

- наружный воздух необходим для комфортного пребывания людей;
- обогрев чистого воздуха отработанным является своеобразным утеплителем.

Безусловно, холодный воздух, особенно сильно насыщенный влагой, забирает тепло с наружных конструкций фасада. Вследствие этого уменьшается энергоэффективность и уменьшается теплоустойчивость ограждающих конструкций. Однако этот отрицательный эффект наблюдается тогда, когда нагретый воздушный поток уходит обратно на улицу, но когда этот нагретый от конструкции воздух начинает свое движение в обратном направлении, а именно не на улицу, а в помещение, то наблюдается уже не отрицательный, а положительный эффект.

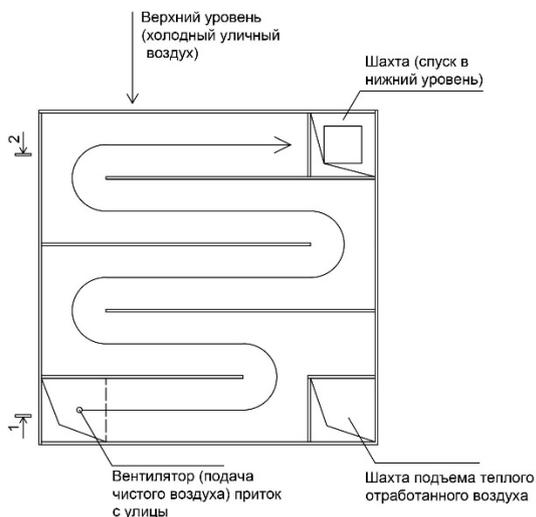


Рисунок 2. – Движение чистого воздуха

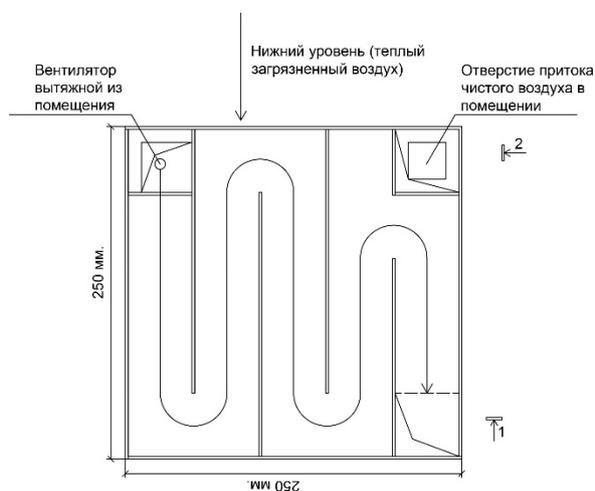


Рисунок 3. – Движение отработанного воздуха

Эффективность конструкции зависит от состава ограждающей конструкции и ее расположения; материалов, которые имеют различные теплофизические показатели; количества приточных и воздуховыводящих отверстий; объема воздуха, поступающего в помещение. Важным элементом в конструкции стены является экранный теплоотражатель, который многократно повышает энергоэффективность конструкции.

Важно правильно подобрать размеры каналов, которые будут осуществлять рекуперацию, а также определить размер и место теплоотражающего экрана.

Если правильно организовать поступление и прохождение наружного воздушного потока в помещение, можно максимально снизить теплопотери.

В рассматриваемом примере холодный наружный воздух после прохождения рубежа входного отверстия сразу становится внутренним воздухом ограждения. Зимой этот воздух не имеет возможности покинуть конструкцию в атмосферу, а лишь может проходить в помещение, получая тепло от выходящего нагретого воздуха. Входное отверстие расположено в нижней части ограждающей конструкции. При направлении движения холодного наружного воздуха в ограждающей конструкции проходит его смешивание с конвекционным воздушным потоком. С самого начала холодный поток начинает забирать тепло у составляющих конструкции (у теплоотражающего экрана и гибких каналов), отработанный воздух выходит наружу через вытяжное отверстие в наружной стене, а холодный воздух, нагретый отработанным воздухом, попадает в помещение.

**Заключение.** На данный момент рациональным вариантом использования энергоэффективных ограждающих конструкций с рекуперацией тепла является применение организованного наружного воздуха с возможностью его регулирования с помощью приточных отверстий с сохранением условий комфортного микроклимата.

Основным преимуществом применения таких конструкций ограждения в строительстве является то, то они могут отлично работать как в зимний период, так и летом в самые жаркие дни.

Выполнены лабораторные испытания на модели жилого здания, в которой будут проводиться испытания различных конструкций наружных стен с установкой соответствующих датчиков регистрации. К настоящему времени проведены предварительные испытания на стандартной установке и получены первые обнадеживающие результаты. Например, требуемое сопротивление теплопередаче для первого образца с применением алюминиевой фольги составило  $0,764 \text{ м}^2 \text{ к/Вт}$ , что больше, чем  $0,623 \text{ м}^2 \text{ к/Вт}$  для контрольного образца с применением минеральной ваты.

После завершения лабораторных испытаний планируется по имеющейся договоренности с заводом КПД строительста № 17 и Новополоцким Горисполкомом провести заводские испытания и, если эти испытания дадут положительный результат, запустить новое решение в серийный выпуск жилых домов сначала

в нашем регионе, а затем и по всей Республике Беларусь, что, возможно, позволит при условии выполнения остальных планируемых нами мероприятий в части внутренних конструкций перейти на открытую систему типизации и т.д., снизить себестоимость строительства примерно в 3 раза, получив стоимость 1 м<sup>2</sup> общей площади жилья менее 350 деноминированных белорусских рублей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Способ получения тонкодисперсного аморфного микрокремнезема : пат. RU 2526454 С1 / В.П. Селяев, А.К. Осипов, А.А. Седова, Л.И. Куприяшкина ; опубл. 30.06.14.
2. Горшков, А.С. Пути повышения энергоэффективности ограждающих конструкций зданий / А.С. Горшков, И.А. Войлоков // Строительная теплофизика энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий : II Всерос. науч.-техн. конф., 10–11 дек 2009 г. : сб. тр. – СПб., 2009. – С. 44–48.
3. Енюшин, В.Н. Энергоэффективность современных ограждающих конструкций / В.Н. Енюшин, А.Д. Нурмухаметова, А.Д. Хаеретдинова // Изв. Казан. гос. архитектурно-строительного ун-та. – 2016. – № 4 (38). – С. 217–221.
4. Жмарин, Е.Н. ЛСТК – инструмент для реализации программы «Доступное и комфортное жилье» / Е.Н. Жмарин, В.А. Рыбаков // СтройПРОФИль. – 2007. – № 6(60) ; № 7(61). – С. 118–119 ; С. 166–167.

Поступила 03.09.2020

## RECOVERY IN ENCLOSING STRUCTURES

**D. SHABANOV, E. BRYANTSEV, I. KRUPENCHIK**

*The methods of thermal insulation of buildings used at present are analyzed. An innovative method of increasing the energy efficiency of enclosing walls, based on the use of constructively new enclosing structures with recuperation of the outgoing heat flux, has been investigated using 3D-printing technology.*

**Keywords:** heat transfer resistance, specific one-time costs, payback, thermal inertia

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГЕОДЕЗИЯ

<i>Шароглазова Г.А., Коровкин В.Н., Новокрещенова Д.Н.</i> Проблема высотного обеспечения в мировой геодезической практике .....	2
<i>Дегтярев А.М., Иваши́нџа А.С.</i> Анализ подходов к решению задачи трансформирования систем координат на основе разных представлений данных .....	9
<i>Михеева А.А., Ялтыхов В.В., Парадня П.Ф.</i> Построение сетей фототриангуляции в программе Agisoft Photoscan .....	15

### ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Ковалевская Н.А., Савенок В.Е., Зязюлькин А.П.</i> Оценка численными методами углеводородного загрязнения почв .....	24
<i>Болботунов А.А., Дегтярева Е.В.</i> Особенности сезонного годичного прироста древесины хвойных пород в насаждениях на севере Беларуси .....	29
<i>Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е.</i> Гидравлическое сопротивление регулярных насадок массобменных аппаратов .....	33

### СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Богущ Р.П., Глухов Д.О., Ягубкин А.Н., Скрипелев Е.А.</i> Комплексная система видеомониторинга испытаний прочности и деформативности строительных материалов и конструкций .....	39
<i>Горовых О.Г., Волосач А.В.</i> Изменение поверхностной твердости ячеистых бетонов при термическом воздействии и последующем охлаждении водой .....	45
<i>Лазаренко О.В., Ягубкин А.Н.</i> Внедрение ВМ-технологий в отрасли строительного комплекса Республики Беларусь .....	52
<i>Семенюк С.Д., Москалькова Ю.Г., Ржевуцкая В.А.</i> Особенности определения стесненной усадки керамзитожелезобетона .....	58
<i>Юхневский П.И., Бурсов Н.Г., Димитриади Н.П.</i> Деароматизация растворителя «уайт-спирит» для применения в разделительных смазках .....	66
<i>Козловский В.И., Петров О.А., Боровский Д.Н.</i> Комплексная технология диспергирования меловых наполнителей композитов мокрым способом .....	71
<i>Шабанов Д.Н., Брянецев Е.Г., Крупенчик И.В.</i> Рекуперация в ограждающих конструкциях .....	76