

39. Соколова Н.А. Усовершенствованные мультипликативные модели длительных деформаций бетона.— Дисс. ... канд. техн. наук, спец. 05.23.01, Одесса, 1984 — 230 с.  
 40. Anson N., Newman E. The effect of mix proportions and method of testing of Poisson's ration for mortar and concrete — Mag. Concr. Res., 1966 — 18 — p.p. 115–127.

41. Powers T.C. Fundamental aspects of shrinkage of concrete.— Third Int. Cog. Precast. Ind., Stockholm, 1960 — p.p. 1–18.  
 42. Dougill J.W. ACI Journal— 1962.— N 9.  
 43. Hirsh T.J. ACI Journal.— 1962.— N 3.

УДК 666.972

Кардумян Г.С.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НАПРЯГАЮЩИХ БЕТОНОВ КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ НА ОСНОВЕ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА И СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА

### ВВЕДЕНИЕ

Возведение современных инженерных сооружений невозможно без бетонов нового поколения, отличающихся высокими эксплуатационными свойствами. Сформировавшаяся концепция "High Performance Concrete" (HPC), как известно, основана, прежде всего, на комплексном использовании суперпластификаторов (СП) и микрокремнезема (МК).

Ниже приведена информация о свойствах напрягающего цемента (НЦ) и комплексного модификатора МБ-01 и результатах исследований свойств бетонов полученных при их применении. Исследования проводили с целью оценить эффективность модифицированных напрягающих бетонов.

Использование напрягающего цемента или портландцемента с расширяющей добавкой является одним из способов получения вместо традиционной усадки эффекта расширения бетона и самонапряжения железобетона. Исходными материалами для НЦ являются портландцемент или клинкер портландцемента и расширяющий компонент, состоящий из вещества, содержащего алюминаты кальция, и гипса любой модификации. Подбирая соотношение компонентов в системе С-А-С (С — оксид кальция, А — диоксид алюминия, С — сульфат кальция) и вид исходных веществ, можно направить развитие процесса гидратации по желаемому руслу и получить в заданный отрезок времени необходимое количество и виды цементных новообразований.

Расширение и самонапряжение бетонов на напрягающем цементе завершаются за 7-12 дней, после чего цемент продолжает твердеть и набирать высокую прочность [1].

Растворы и бетоны на напрягающем цементе обладают низкой проницаемостью (выше марки W12), являющейся

следствием самонапряжения структуры, высокой прочностью не ниже С 30/40, повышенной стойкостью к воздействию различных агрессивных сред [2].

Комплексный модификатор бетона представляет собой порошкообразный продукт с насыпной массой 750–800 кг/м<sup>3</sup>, состоящий из гранул размером до 100 мкм [3]. Каждая гранула представляет собой агрегат из ультрадисперсных частиц микрокремнезема, покрытых затвердевшей адсорбционной пленкой из молекул суперпластификатора и регулятора твердения. Обладая сравнительно высокой насыпной массой и представляя собой композиционный материал комплексный модификатор является удачной добавкой для применения в технологии бетона. Используемый на строительном рынке микрокремнезем даже в уплотненном состоянии ( $\rho_n = 500 \text{ кг/м}^3$ ) вызывает проблемы при производстве бетонов, требуя устройства специальной линии подачи и дозирования микрокремнезема и суперпластификатора.

Формирование структуры цементного камня и бетона с применением комплексного модификатора происходит в соответствии с закономерностями [4], характерными для системы с микрокремнеземом и суперпластификатором. Как следует из [5], при расходе обычного портландцемента M400 в пределах 500 кг/м<sup>3</sup> можно получить бетоны сверхвысокой прочности ( $f_c = 80\text{--}100 \text{ МПа}$ ), низкой проницаемости (выше марки W16), повышенной стойкости к воздействию сульфатов, хлоридов и слабых кислот, т.е. бетоны с высокими эксплуатационными свойствами.

Таблица 1

Химический состав напрягающего цемента, %.

Вид цемента	п.п.п	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	CaO <sub>св</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>
НЦ-40	2,47	20,37	4,02	8,01	58,57	0,20	1,0	4,58

Таблица 2

Минералогический состав исходного клинкера, %.

Вид цемента	C <sub>1</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	Вид и количество добавки, %
НЦ-40	59,14	17,78	4,53	15,28	Гипсовый камень — 12 Глиноземистый цемент — 19

Таблица 3

Физико-механические свойства напрягающего цемента, испытанного по ТУ РБ 02071613.183-99.

Вид цемента	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	Нормальная густота цементного теста, %	Сроки схватывания		Линейное расширение, ε, %	Самонапряжение, Sp, МПа	Предел прочности в возрасте 28 сут, МПа, при	
			начало	конец			сжатии	изгибе
НЦ-40	360	25	55 мин	2ч 05 мин	0,7	4,25	47,3	12,8

Кардумян Галина Суменовна. Кандидат технических наук, доцент, докторант Белорусской государственной политехнической академии.

Беларусь, БГПА, 22027, г Минск, пр. Ф. Скорины 65.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Для экспериментов использованы материалы со следующими характеристиками:

- напрягающий цемент НЦ-40 с энергией расширения 4,0 МПа. НЦ изготовлен из клинкерного портландцемента М500, глиноземистого цемента и гипсового камня. Данные о составе цемента и его свойствах представлены в таблицах 1–3.
- комплексный модификатор бетона марки МБ-01 – порошок на органо-минеральной основе с  $\rho_n = 780 \text{ кг/м}^3$ , содержит в своем составе микрокремнезем конденсированный в количестве 88,8 %, суперпластификатор – 8,8 %, регулятор твердения – 1,2 %, влагу – 1,2 %. Производится в России предприятием "Мастер Бетон" по оригинальной технологии на основании ТУ 5743–073–46584090–98 [3].
- песок кварцевый с модулем крупности  $M_k = 2,1$ .

Сравнительные испытания были проведены на образцах мелкозернистого бетона составов:

- напрягающий цемент (НЦ-40): песок – 1:1 по массе при  $V/C = 0,3$ ;
- напрягающий цемент (НЦ-40): модификатор МБ-01: песок – 1:0,1:0,9 по массе при  $V/C = 0,27$ .

Состав мелкозернистого бетона был назначен согласно [6]. Принятое соотношение  $C/P$  отражает реальное соотношение материалов в растворяющей части высокопрочного бетона железобетонной конструкции. Количество модификатора МБ-01, равное 10 % от массы цемента было выбрано согласно рекомендаций [3].

Условия работы бетона на НЦ в конструкции моделировали с помощью двух типов образцов, различающихся по типу ограничения деформаций расширения:

- образцы-призмы  $40 \times 40 \times 160$  мм, твердевшие без ограничения деформаций расширения – в "свободном" состоянии;
- образцы-призмы  $40 \times 40 \times 160$  мм, твердевшие в условиях одноосного ограничения деформаций расширения (в динамометрических кондукторах), эквивалентного 1 % –му армированию;
- образцы-призмы  $31,5 \times 31,5 \times 95$  мм, твердевшие в условиях одноосного ограничения деформаций расширения (в динамометрических кольцах), эквивалентного 1 % –му армированию.

Для оценки свойств напрягающего и напрягающего модифицированного бетона были использованы стандартные методы испытаний (определение показателей самоупругения, линейного расширения, прочностных характеристик) согласно [6].

В соответствии со стандартными условиями испытаний образцы I серии помещали в воду после одних суток их твердения в воздушно-сухих условиях. К этому времени образцы, имевшие в своем составе МБ, имели прочность при сжатии  $f_c^1 = 22,7$  МПа, в то время как аналогичный показатель для базовых образцов составлял 15,04 МПа. Последующее твердение в водных условиях привело к тому, что к моменту стабилизации процесса расширения самоупругение в базовых образцах составило 4,25 МПа, а в образцах с МБ – 2,25 МПа. Обращает на себя внимание тот факт, что как базовые образцы, так и образцы аналоги с МБ к моменту стабилизации процесса расширения (28 суток после бетонирования) имели практически одинаковую прочность как при сжатии, так и при растяжении (рис. 1з, кривые 1, 2). При этом была другой кинетика как самоупругения, так и набора прочности в образцах, содержащих МБ. Как видно из рис. 1з, основной прирост связанных деформаций расширения для образцов с МБ данной серии наблюдали в первые–четвертые сутки после их

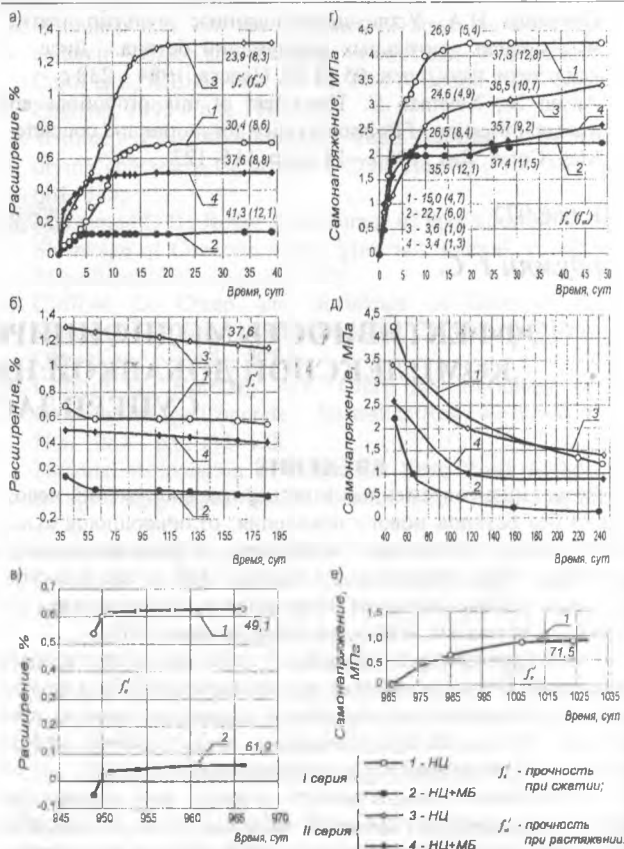


Рисунок 1. Изменения линейного расширения (а, б, в) и самоупругения (г, д, е) образцов на основе напрягающего цемента и с добавкой МБ-01 в зависимости от условий хранения.

а, г, в, е – водные условия; б, д – воздушно-сухие условия

хранения в водных условиях ( $\Delta f_{с,м} = 2,0$  МПа, что соответствует около 94 % общих деформаций), а в последующие 28 суток этот прирост составил всего лишь 6 %. Начало стабилизации связанного расширения для образцов I серии с МБ наблюдали уже к четвертым суткам водного хранения. Аналогичная кинетика расширения имела место и в образцах, твердевших без внешнего ограничения (рис. 1а, кривые 1, 2).

Среди причин, приводящих к стабилизации процесса расширения можно рассматривать с одной стороны исчерпание энергетических возможностей материала (с точки зрения образования этрингита, как источника расширения), а с другой – наличие достаточно жесткого препятствия, снижающего способность материала к внешнему проявлению деформаций или так называемому "визуальному эффекту" процесса расширения.

Учитывая то обстоятельство, что базовые образцы, находясь в аналогичных условиях твердения, имели прирост деформаций расширения в течение 20 суток, а достигнутое самоупругение превышало в 1,8 раза самоупругение, полученное в образцах с МБ, следует предположить, что к моменту стабилизации расширения в образцах с МБ энергетические возможности материала не были исчерпаны, а к этому времени появилась дополнительное ограничение, роль которого выполняла структура твердеющего бетона. Принимая во внимание кинетику набора прочности образцов с МБ (рис. 1з) можно предположить, что собственная структура бетона становится достаточно мощным ограничением, препятствующим расширению, т.е. ускоренный набор прочности от 22,7 МПа в возрасте 1 суток до 35,5 МПа в возрасте 14 суток снижает конечную величину расширения. Эти вопросы с позиций физико-химических явлений, геометрии деформаций и структурной механики достаточно подробно рассмотрены в работе [7]. При анализе ре-

зультатов опыта был выявлен и ещё один, интересный на наш взгляд, эффект. В образцах, содержащих МБ прирост прочности при сжатии составил всего 2 МПа (от 35,5 МПа – в возрасте 14 суток, до 37,4 МПа – в возрасте 32 суток), в то время как для базовых образцов эта величина составила более 10 МПа. Наблюдавшаяся стабилизация расширения образцов с МБ при одновременной стабилизации роста прочности может объясняться с одной стороны наступлением некоторого равновесного состояния в структуре материала, когда существует баланс между разрушающимися и восстанавливающимися связями и не наблюдается требуемой степени разуплотнения а, следовательно, и расширения. Вместе с тем, нет и заметного роста прочности материала. Необходимо отметить, что стабилизация связанного расширения в базовых образцах, хотя и наступала в более поздние сроки, чем в образцах-аналогах с МБ, уровень достигнутых самонапряжений был более высоким ( $f_{ce,m} = 4,25$  МПа), но при прочности практически совпадающей с прочностью при которой происходила стабилизация расширения для образцов с МБ. Таким образом, исследования образцов I серии подтвердили данные о влиянии начальной прочности к моменту интенсивного увлажнения напрягающего бетона на величину достигаемых деформаций [8].

Принимая во внимание, что на величину достигаемого расширения оказывает влияние начальная прочность материала к моменту интенсивного увлажнения при испытании образцов II серии были изменены условия опыта. Образцы помещали в водные условия через 6,5 часов после их бетонирования, когда они имели практически одинаковую прочность при сжатии  $f_c' = 3,6$  МПа – для базовых образцов и 3,4 МПа – для образцов, содержащих МБ.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 1а, 2 такая технологическая операция привела, в первую очередь, к существенным изменениям в кинетике развития как свободных, так и связанных деформаций. В первые 8 суток после бетонирования деформации связанного расширения как для базовых образцов, так и для образцов аналогов, содержавших МБ были практически одинаковы (рис. 1з, кривые 3, 4). После 8 суток водного хранения вновь наблюдали ярко выраженный участок стабилизации расширения для образцов-аналогов с МБ, в то время как расширение базовых образцов из НЦ возрастало. Вместе с тем к этому времени существенного отличия в прочности при сжатии как базовых образцов, так и образцов аналогов не наблюдали. При анализе причин этого явления установлено, что применение МБ в сочетании с НЦ позволило, в данном случае, существенно не изменив прочности при сжатии, примерно вдвое повысить прочность при растяжении. Так в возрасте 14 суток прочность бетона при растяжении составляла для базовых образцов II серии  $f_{ct}' = 4,9$  МПа, для образцов с МБ  $f_{ct}' = 8,4$  МПа. Аналогичным образом выглядит соотношение прочностей бетона при растяжении для образцов I серии: для базовых образцов  $f_{ct}' = 5,4$  МПа в то время как для образцов с МБ  $f_{ct}' = 12,1$  МПа. Следует отметить, что величины достигнутых самонапряжений и характер кривых после начала стабилизации процесса расширения у образцов с МБ в I и II сериях мало отличаются (рис. 1з, кривые 2, 4). Принимая во внимание, что ограничивающие свойства собственной структуры материала зависят главным образом от её прочности при растяжении, следует ожидать, что образцы с МБ должны иметь меньшие значения как свободных, так и связанных деформаций. При этом следует учитывать и то, что наличие в структуре материала МБ приводит и к физико-химическим изменениям, влияющим на развитие как процессов набора прочности, так и расширения. Однако, эти явления требуют более тщательного изучения.

Обращает на себя внимание и соотношение так называемых "свободной" и "связанной" прочностей, определенных на образцах, твердевших без ограничения и в условиях упругого

ограничения при  $\rho_l = 1\%$ . Так в возрасте 28 суток соотношение "свободной" и "связанной" прочностей для базовых образцов составляло: 1,2 для образцов I серии и 1,5 для образцов II серии, в то время как для образцов аналогов с МБ это соотношение было близким к единице.

При анализе результатов, полученных при твердении образцов в воздушно-сухих условиях после окончания водного хранения, наблюдали как снижение достигнутых самонапряжений, так и свободных деформаций. Однако, если снижение начальных деформаций расширения в свободных условиях составляло, в среднем, 11–16 % от максимальных значений, то связанные деформации, достигнутые к моменту стабилизации расширения, снижались почти полностью, что приводило к потерям 70–100 % максимального самонапряжения (рис. 1б, д). Необходимо отметить, что потери начального расширения в образцах с МБ и базовых образцах, как в первой, так и во второй серии были достаточно близки (14 % – для серии I; 10,6 % – для серии II) (рис. 1б).

Наблюдаемый эффект существенного снижения начальных самонапряжений в образцах, твердевших в несвободных условиях (при  $\rho_l = 1\%$ ) следует, очевидно, связывать не только с усадкой, но и развивающейся ползучестью при действии сжимающих напряжений (самонапряжений).

На полученные результаты несомненно оказывает влияние масштабный фактор испытанных образцов и порядок измеряемых величин деформаций самонапряжения и линейного расширения. Так, для определения величины самонапряжения использованы образцы – призмы 31,5×31,5×95 мм, а линейного расширения – 40×40×160 мм. Прирост величины измеряемой деформации при оценке самонапряжения (при  $\rho_l = 1\%$ ) за сутки составляет примерно  $(2,3) \cdot 10^{-2}$  мм, в то время как линейного расширения  $(30,40) \cdot 10^{-2}$  мм.

Следует отметить и тот факт, что в результате повторного водного выдерживания образцов после 950 суток воздушно-сухого хранения (при средней температуре  $T = 17,5^\circ\text{C}$  и влажности  $RH = 65\%$ ) наблюдали восстановление деформаций свободного расширения за 2–3 суток около 40 % от потерь деформаций (рис. 1в). Для образцов, находившихся в связанных условиях, эта величина составила около 20 % от полных деформаций усадки и ползучести (рис. 1е).

## ВЫВОДЫ

1. Применение МБ совместно с напрягающим цементом приводит к изменению кинетики процесса расширения. На графиках самонапряжения образцов с МБ наблюдается ярко выраженный участок стабилизации связанного расширения в ранний период твердения, в то время как базовые образцы на НЦ демонстрируют медленно затухающий процесс расширения. Наблюдаемое явление следует связывать с одной стороны с отличной от базовых образцов кинетикой набора прочности модифицированных бетонов (главным образом при растяжении), а с другой – с физико-химическими изменениями, происходящими в твердеющей структуре в присутствии МБ. Применение МБ приводит к снижению величины как свободных, так и связанных деформаций расширения.
2. Применение МБ совместно с напрягающим цементом не привело к существенным изменениям в длительных процессах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сенкевич Т.П., Рагольский С.З., Померанец В.Н. Железобетонные трубы. Под ред. С.З. Рагольского. – М.: Стройиздат, 1989. – 272 с.

- Kardumian G. High corrosion resistance of self-stressing concrete. – 13 Internationale Baustofftagung, Weimar, Deutschland, 1997. – Band 2, s. 297–305.
- Модификатор бетона МБ-01. Технические условия ТУ 5743-073-46584090-98. – М.: НИИЖБ, 1998. – 27 с.
- Каприелов С.С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов. – Бетон и железобетон. – 4 (1995). – С. 16–20.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Микрокремнезем в бетоне: – Обзорная информация. – М.: ВНИИСТ, 1993. – 55 с.
- Цемент напрягающий. Технические условия ТУ РБ 02071613.183-99. – Брест, БПИ, 1999. – С. 14.
- Красильников К.Г., Никитина Л.В., Скоблинская Н.Н. Физико-химия собственных деформаций цементного камня. – М.: Стройиздат, 1980. – 255 с.
- Kardumian G., Krol M., Tur V. Technological and Structural Properties of Self-Stressed Concrete. – "75 Jahre Quellzement", Int. Symp., Weimar, Deutschland, 1995. – HAB Universität, s. 129–137

УДК 624.012

Прокопня О.Н.

## ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛНОВЕСНЫХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА

В настоящее время при расчете железобетонных конструкций используют плновесные диаграммы деформирования бетона, которые отличаются наличием ниспадающей ветви, соответствующей стадии разрушения образца. Данная стадия характеризуется снижением напряжений и соответственно, силы нагружения по мере увеличения деформации. Для получения указанных диаграмм требуется соответствующее оборудование, которое в Республике Беларусь практически отсутствует. Поэтому работы, направленные на его создание, представляют практический интерес.

Деформирование образца осуществляется в результате его взаимодействия с испытательной машиной. Расчетная схема данной системы приведена на рис. 1а. Она представляет собой замкнутый контур, содержащий упругие элементы, которыми представлена машина и образец, а также выходное звено механизма нагружения в виде гидроцилиндра.

Как следует из приведенной схемы, перемещение поршня гидроцилиндра

$$S_{ГЦ} = \Delta l_M + \Delta l_0, \quad (1)$$

где  $\Delta l_M$  и  $\Delta l_0$  - деформация машины и образца.

Диаграмму деформирования машины с достаточной степенью точности можно считать линейной. Тогда

$$\Delta l_M = P_{ГЦ} / c_M, \quad (2)$$

где  $P_{ГЦ}$  - сила, создаваемая гидроцилиндром;  $c_M$  - жесткость машины.

Для простоты, восходящую и ниспадающую ветви диаграммы деформирования образца также будем считать линейными. Тогда для восходящей ветви диаграммы

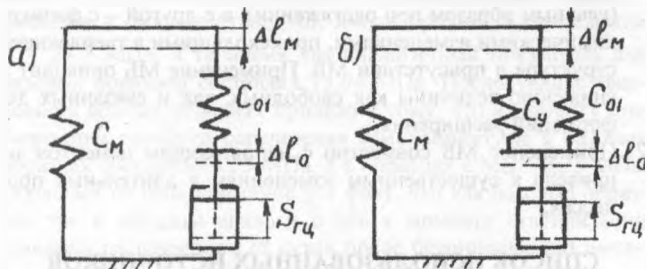


Рисунок 1. Расчетная схема системы «машина-образец» а) – исходная; б) – с упругими элементами

$$\Delta l_0 = P / c_{01}, \quad (3)$$

где  $P$  - сила, действующая на образец;  $c_{01}$  - жесткость образца на восходящей ветви.

Учитывая, что для данной схемы  $P = P_{ГЦ}$ , из (1) с учетом (2), (3) получаем

$$P_{ГЦ} = S_{ГЦ} / (1/c_M + 1/c_{01}) \quad (4)$$

Графическая иллюстрация процесса взаимодействия в системе согласно (1), (4) приведена на рис. 2. Точка D, лежащая на пересечении диаграмм машины и образца, определяет состояние равновесия при заданном положении поршня гидроцилиндра. Оно является устойчивым, так как случайное отклонение  $\Delta l_0$  в сторону увеличения приводит к тому, что сила сопротивления со стороны образца становится больше силы, создаваемой гидроцилиндром, и дальнейший рост  $\Delta l_0$  невозможен.

Следовательно, процесс деформирования образца на восходящей ветви диаграммы (отрезок АВ) полностью контролируем, то есть сила нагружения однозначно определяется перемещением поршня гидроцилиндра в соответствии с (4).

На ниспадающей ветви диаграммы состояние равновесия определяется положением точки D'. Оно является устойчивым, если диаграмма деформирования машины (1 на рис. 2) имеет больший наклон, чем диаграмма деформирования образца (отрезок ВС).

Для ниспадающей ветви диаграммы

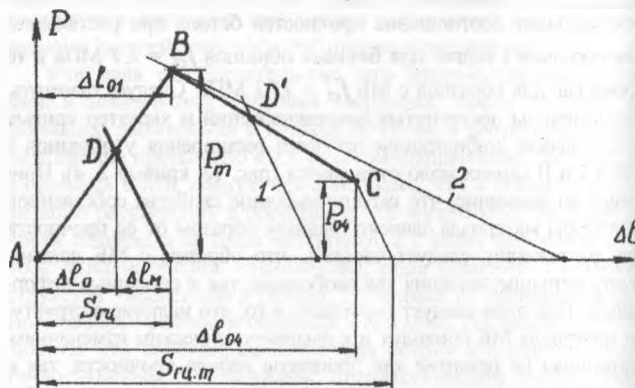


Рисунок 2. Взаимодействие в системе «образец-машина»

Прокопня Олег Николаевич. К.т.н., доцент каф. автоматизации технологических процессов и производства Брестского государственного технического университета. Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская 267.