лиальных опухолях. Платформа позволяет анализировать более 25 000 CpG-островков [24]. Illumina (San Diego) BeadArrays представляют собой один из наиболее совершенных инструментов для полногеномного анализа и анализа метилирования определенных участков ДНК. Позволяет детектировать метилирование 2,5% CpG-нуклеотидов и требует около 200 нг ДНК для анализа [25].

Микроматричный анализ отличается от секвенирования большей простотой и доступностью. Данные, полученные этим методом, легче интерпретировать. В то же время микроматричные анализаторы имеют и ряд недостатков: более низкое разрешение, метилирование обнаруживается только в повторяющихся последовательностях генома млекопитающих, так как метод основан на гибридизации и, таким образом, не дает полного представления о геномном метилировании. Тем не менее на сегодняшний день это наиболее удобный метод для использования в клинической практике [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ванюшин Б. Ф.* ,, Химия и жизнь. – 2004. – № 2. – С. 32–37.
2. *Сидоров Л. Н.* // Химия. – 2000. – № 4. – С. 24–30.
3. *Allis C. D., Jenuwein T., Reinberg D.* Epigenetic. – Cold Spring Harbor; New York, 2007. – P. 23–61.
4. *Buchholz T., Jackson J., Robson L., Smith A.* // Hum. Genet. – 1998. – Vol. 103, N 5. – P. 535–539.
5. *Eads S., Danenberg D. K., Kawakami K.* et al. // Nucl. Acids Res. – 2000. – N 8. – C. 1–8.
6. *Gupta R., Nagarajan A., Wajapeyee N.* // Bio. Techniques. – 2010. N 4. – P. 3–11.
7. *Kaur H., Halliwel B.* // Biochem. J. – 1996. – Vol. 318. – P. 21–23.
8. *Kubota T., Aradhya S., Macha M.* et al. // J. Med. Genet. – 1996. – Vol. 33. – P. 1011–1014.
9. *Maniatis T., Fritsch E. E., Sambrook J.* Molecular cloning. A laboratory manual. – Cold Spring Harbor; New York, 1982.
10. *Pappas J. J., Toulouse A., Bradley W. E. C.* // Biol. Procedures Online. – 2009. – N 1. – C. 99–112.
11. *Robertson K. D.* // Nat. Rev. Genet. – 2005. – N 4. – P. 597–610.
12. *Song F., Smith J. F., Kimura M. T.* et al. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2205. – N 9. – C. 3336–3341.
13. *Tsou J. A., Hagen J. A., Carpenter C. L.* et al // Oncogene. – 2002. – Vol. 21. – P. 5450–5461.
14. *Vanaja D. K., Ehrich M., Van den Boom D.* et al. // Cancer Invest. – 2009. – Vol. 27, N 5. – P. 549–560.
15. epigenome-noe.net/researchtools/protocol.php
16. http://www.sequenom.com/Home/Products–-Services/Genetic-Analysis/MassARRAY-Analyzer-4
17. http://www.methods.info/Methods/DNA_methylation/Restriction_analysis.html
18. http://www.epigeneticstation.com/sodium-bisulfite-dna-sequencind/
19. http:/www.methods.info/Methods/DNA_methylation/Bisulphite_sequencing.html
20. http://www.epigeneticstation.com/methylation-specific-pcr/
21. http://www.methods.info/Methods/DNA_methylation/SNuPE.html
22. http://www.nimblegen.com/products/lit/epigenetics_brochure_2010_02_23.pdf
23. http://www.affymetrix.com/estore/browse/brand/affymetrixMicroarraySolutions/brandAffymetrixMicroarraySolutions-overview.jsp
24. http://www.genomics.agilent.com/Human CpG Island Microarrays
25. http://www.illumina.com/applications.ilmn#custom_low_to_mid_plex_methylation_analysis

Поступила 05.04.11

© К. В. ЗОЛОТАРЕВ, 2012

УДК 616-074/-078

К. В. Золотарев

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДБОР ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ЦЕНТРИФУГИ И ВРЕМЕНИ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ В ХИМИЧЕСКОЙ, БИОХИМИЧЕСКОЙ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

Учреждение РАМН Научно-исследовательский институт биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича РАМН, Москва

В химической, биохимической и микробиологической практике часто приходится сталкиваться с суспензиями. Суспензиями называют дисперсные системы с твердой дисперсной фазой и жидкой дисперсионной средой, в которых размер частиц дисперсной фазы составляет более 100 нм (10^{-7} м). Часто возникает необходимость отделить твердые частицы от жидкости. Если для этого использовать осаждение в гравитационном поле, то процесс осаждения может протекать слишком долго. Эффективным способом является осаждение в поле центробежных сил – центрифугирование. Частоту вращения ротора центрифуги и время центрифугирования можно подобрать аналитически, используя закономерности общей динамики и гидродинамики. Для этого необходимо написать и преобразовать объединенное уравнение первого и второго законов Ньютона для частицы суспензии, находящейся в поле центробежных сил и сил сопротивления жидкости и стенки сосуда. Сила сопротивления жидкости зависит от режима движения частицы в жидкости. Для определения режима следует использовать численные безразмерные критерии Архимеда и Рейнольдса. В настоящей статье эти преобразования проведены и получена аналитическая обратно пропорциональная зависимость времени центрифугирования от частоты вращения. Рассчитав серию данных "частота–время", можно выбрать оптимальную пару данных, исходя из возможностей центрифуги и практической целесообразности. Результаты расчетов подтверждаются реальными опытными данными, поэтому полученный физико-математический аппарат может считаться эффективным.

Поскольку ход подбора зависит от параметра (критерий Рейнольдса), а также то, что необходимо для подбора рассчитать серию данных, удобнее всего этот расчет запрограммировать. Предлагается проводить его с помощью программы Microsoft Excel и программирования на языке VBA в приложении к ней. Для удобного и быстрого решения задачи предлагается возможность скачивания готового файла из Интернета и использования его.

Ключевые слова: *центрифугирование, частота вращения ротора, время центрифугирования, седиментация*

K.V. Zolataryev

THE ANALYTICAL SETTING OF ROTARY SPEED OF CENTRIFUGE ROTOR AND CENTRIFUGATION TIME IN CHEMICAL, BIOCHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL PRACTICE

The researchers happen to face with suspensions in their chemical, biochemical and microbiological practice. The suspensions are the disperse systems with solid dispersed phase and liquid dispersion medium and with dispersed phase particle size >100 nm (10-7 m). Quite often the necessity occurs to separate solid particles from liquid. To use for this purpose the precipitation in gravitation field can make the process to progress too long. In this respect an effective mode is the precipita-tion in the field of centrifugal forces - the centrifugation. The rotary speed of cen-trifuge rotor and centrifugation time can be set analytically using regularities of general dynamics and hydrodynamics. To this effect, should be written and trans-formed the equation of First and Second Newton Laws for suspension particle be-ing in the field of centrifugal forces and forces of resistance of liquid and vessel wall. The force of liquid resistance depends on particle motion condition in liquid. To determine the regimen the Archimedes and Reynolds numerical dimensionless criteria are to be applied. The article demonstrates the results of these transfor-mations as analytical inverse ratio dependence of centrifugation time from rotary speed. The calculation of series of "rate-time" data permits to choose the optimal data pair on the assumption of centrifuge capacity and practical reasonability. The results of calculations are validated by actual experimental data hence the physical mathematical apparatus can be considered as effective one.

The setting progress depends both from parameter (Reynolds criterion) and data series calculation. So, the most convenient way to apply this operation is the pro-gramming approach. The article proposes to use the program Microsoft Excel and VBA programming language for this purpose. The possibility to download the file from Internet to use it for fast solution is proposed.

Key words: *centrifugation, rotary speed of rotor, centrifugation time, sedimentation*

Введение. Обоснование исследования и постановка его цели. В природе и в человеческой деятельности постоянно приходится сталкиваться с дисперсными системами, в частности с суспензиями. Дисперсные системы представляют собой системы, состоящие из двух или более компонентов и обладающие двумя отличительными особенностями – гетерогенностью и дисперсностью. Система называется гетерогенной, если она обладает межфазной поверхностью, т. е., например, состоит из твердой части и газообразных пор (пористое тело), несмешивающихся жидкостей (эмульсия) и т. д. В такой системе или невооруженным глазом, или с помощью приборов можно различить границу этих компонентов, находящихся в разных фазах (твердой, жидкой или газообразной). Под дисперсностью системы понимается то, что в ней есть сплошной, нераздробленный компонент (дисперсионная среда) и один или несколько раздробленных компонентов, т. е. частиц, пузырьков, пылинок и т. д. (дисперсная фаза). По агрегатному состоянию дисперсионной среды и дисперсной фазы проводится классификация дисперсных систем, представленная в табл. 1. Следует, однако, понимать, что приведенные критерии классификации и определения дисперсных систем имеют идеальный характер и не всегда точно соблюдаются. Например, не всегда дисперсная фаза оказывается сплошной во всем объеме системы. Вместе с тем критерии близки к истине, можно им доверять и их использовать.

Как видно из табл. 1, суспензии – это дисперсные системы с жидкой дисперсионной средой и твердой дисперсной фазой. От золей их отличает то, что линейный размер частиц дисперсной фазы составляет более 100 нм (10^{-7} м). Из этого различия вытекает то, что масса частиц золя также очень низкая, причем до такой степени, что силы тяжести, действующие на них, оказываются сопоставимыми с силами давления молекул на них в процессе хаотичного теплового движения. У суспензий же чем больше размер частиц, тем сильнее влияние гравитации, поэтому они менее стабильны [3].

В то же время стабильность системы не всегда полезна. Часто бывает необходимо отделить частицы от среды, особенно в микробиологической (отделение микробной биомассы от культуральной жидкости) и биохимической (осаждение белков, полисахаридов, кровяного сгустка и т. д.) практике. Чем меньше частица, тем медленнее она осаждается под действием земного притяжения. Так, например, чтобы осадить в воде частицу размером порядка 1 мкм (например, бактерию) на 1 см, потребуется более 40 мин [3]. Для ускорения процесса осаждения используется центрифугирование – осаждение в поле центробежных сил, возникающих при вращении некоторого объема системы. При высоких частотах осаждение можно значительно ускорить, однако не всегда очевидно, насколько высокой должна быть частота вращения (т. е. число полных оборотов в единицу времени) и на какое время необходимо запустить центрифугу. Как правило, эти параметры выбираются эмпирически, "на глаз". Существует, однако, физико-математический аппарат, описывающий процесс седиментации (т. е. осаждения) твердых частиц в жидкости в гравитационном поле, который можно адаптировать к осаждению и в поле центробежных сил и рассчитать, пусть и в некотором приближении, частоту и время. Кроме того, использование этого аппарата может, несомненно, помочь и в том случае, когда необходимо избирательно осадить частицы в определенном интервале размеров из сложной суспензии, т. е. произвести дифференциальную седиментацию. Целью настоящей работы является разработка такого физико-математического аппарата, который позволит легко, быстро и с достаточной точностью рассчитывать время центрифугирования и частоту вращения ротора центрифуги.

Физико-математическое описание процесса седиментации твердых частиц в суспензии при центрифугировании. При движении тела в жидкости (или при обтекании неподвижного тела движущейся жидкостью) возникают сопротивления, для преодоления которых и обеспечения равномерного движения тела должна быть затрачена определенная энергия. Величина возникающего сопротивления зависит главным образом от режима движения и формы обтекаемого тела. При ламинарном движении, наблюдающемся при небольших скоростях и малом размере тел или при высокой вязкости среды, тело окружено пограничным слоем жидкости и плавно обтекается потоком (рис. 1, *а*). Потеря энергии в таких условиях связана в основном лишь с преодолением сопротивления трения.

С развитием турбулентности потока (например, с увеличением скорости движения тела) все бóльшую роль начинают играть силы инерции. Под действием этих сил пограничный слой отрывается от поверхности тела, что приводит к понижению давления за движущимся телом в непосредственной близости от него и к образованию беспорядочных местных завихрений в указанном пространстве (рис. 1, *б*). При этом разность давлений жидкости на переднюю (лобовую) поверхности тела, встречающую обтекающий поток,

Для корреспонденции:

Золотарев Константин Владимирович, мл. науч. сотр. лаб. фосфолипидных нанолекарств и транспортных систем
Адрес: 119121, Москва, ул. Погодинская, 10
Телефон: (499) 246-36-31
e-mail:fireaxe@mail.ru

Таблица 1

Классификация дисперсных систем по агрегатному состоянию дисперсной фазы и дисперсионной среды

Дисперсионная среда	Дисперсная фаза	Условное обозначение системы	Название системы и примеры
Твердая	Твердая (Т)	Т/Т	Твердые гетерогенные системы: минералы, сплавы, ситаллы, бетон, композитные материалы
	Жидкая (Ж)	Ж/Т	Капиллярные системы: жидкость в пористых телах, в адсорбентах; почвы, грунты
	Газообразная (Г)	Г/Т	Пористые тела: адсорбенты и катализаторы в газах
Жидкая	Твердая (Т)	Т/Ж	Суспензии и золи: промышленные, микробные суспензии, пульпы, взвеси, пасты, илы
	Жидкая (Ж)	Ж/Ж	Эмульсии: природная нефть, кремы, молоко
	Газообразная (Г)	Г/Ж	Газовые эмульсии и пены: флотационные, противопожарные, мыльные пены
Газообразная	Твердая (Т)	Т/Г	Аэрозоли (пыли, дымы), порошки
	Жидкая (Ж)	Ж/Г	Аэрозоли: туманы (в том числе промышленные), облака
	Газообразная (Г)	Г/Г	Дисперсная система не образуется

и на его заднюю (кормовую) поверхности все больше превышает разность давлений, возникающую при ламинарном обтекании тела. Начиная с некоторых значений критерия Рейнольдса роль лобового сопротивления становится преобладающей, а сопротивлением трения можно практически пренебречь. (Критерий Рейнольдса является мерой соотношения силы трения и силы, движущей твердое тело в жидкости или наоборот). В этом случае наступает турбулентный, или автомодельный, режим движения частицы. Сила

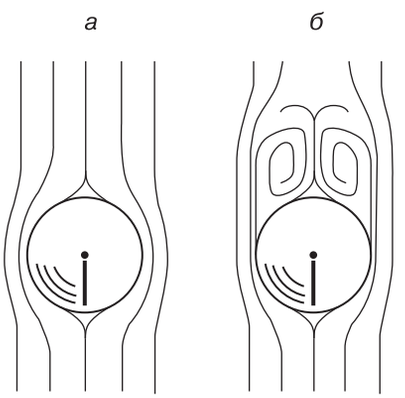


Рис. 1. Движение твердого тела в жидкости.
а – ламинарный поток; *б* – турбулентный поток.

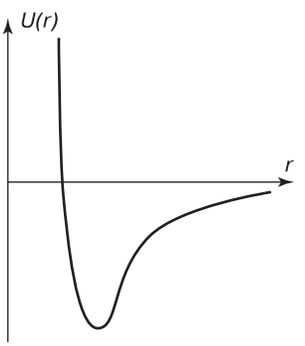


Рис. 2. Зависимость суммарной энергии межмолекулярного взаимодействия от расстояния между молекулами.

При уменьшении расстояния суммарная энергия выходит в положительную область, т. е. область отталкивания, и растет с высокой скоростью приращения. Это обеспечивает рост сопротивления движению тела при центрифугировании [4].

сопротивления F_c среды (т. е. дисперсной фазы) движущемуся в ней телу может быть выражена уравнением закона сопротивления:

$$F_c = \xi S \frac{\rho_0 v^2}{2}, \quad (1)$$

где S – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению его движения, м^2; ξ ("кси") – коэффициент сопротивления среды; ρ_0 – плотность среды, кг/м^3; v – скорость движения тела, м/с [1].

Рассмотрим динамику движения твердого тела в жидкости при центрифугировании. В начале вращения его скорость возрастает, возрастает и скорость перемещения тела относительно стенок сосуда с суспензией, однако вскоре после выхода центрифуги на постоянное число оборотов в единицу времени скорость движения тела относительно стенок стабилизируется и становится постоянной. Казалось бы, вращение происходит за счет центростремительного (направленного к оси вращения) ускорения, поэтому тело за счет центробежной (направленной от оси) инерционной силы должно двигаться центробежно с возрастающей скоростью. В начале вращения действительно так происходит, но с ростом центробежной скорости повышается сопротивление движению, которое в конце концов уравновешивает центробежную силу. Рост сопротивления вызван тем, что молекулы жидкости в приграничном с телом слое уплотняются, а с уменьшением расстояния между ними растет энергия взаимного отталки-

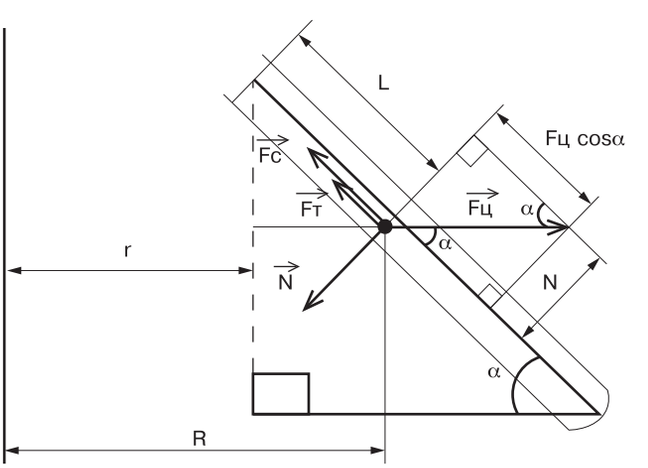


Рис. 3. Силы, действующие на частицу при центрифугировании. Схематично показана пробирка с суспензией, вращающаяся вокруг вертикальной оси.

Таблица 2

Поправочные коэффициенты φ на форму частицы для расчета скорости ее осаждения

Форма частицы	φ
Округлая	0,77
Угловатая	0,66
Продолговатая	0,58
Пластинчатая	0,43

вания (рис. 2). Таким образом, поскольку движение вдоль стенок сосуда равномерное, в соответствии с первым и вторым законами Ньютона векторная сумма сил, действующих на частицу, равна нулю. Рассмотрим силы, действующие на нее (рис. 3).

Согласно данным, представленным на рис. 3, на частицу действуют следующие силы:

1) центробежная сила $F_ц$:

$$F_ц = m_{от} a_ц = (\rho - \rho_0) \frac{\pi d^3}{6} \cdot 4\pi^2 n^2 R = \frac{2}{3} \pi^3 d^3 (\rho - \rho_0) n^2 (L \cos\alpha + r);$$

2) сила сопротивления жидкости F_c. В соответствии с уравнением (1) она равна:

$$F_c = \xi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_o (\varphi v)^2}{2} = \frac{\pi \xi \rho_0 d^2 \varphi^2 L^2}{8\tau^2};$$

3) сила реакции опоры N. В соответствии с рис. 3 она по модулю равна $F_ц \sin\alpha$;

4) сила трения частицы о стенку сосуда $F_т$, равная $\mu_т N = \mu_т F_ц \sin\alpha$;

5) сила трения частицы о стенку сосуда $F_т$, равная $\mu_т N = \mu_т F_ц \sin\alpha$;

5) сила тяжести. Она действует, однако ее величина много меньше центробежной силы, поскольку лабораторные центрифуги вращают с частотой не менее 1000 об/мин. В связи с этим учитывать ее в расчете не имеет смысла и на рис. 3 она не показана.

Таким образом, если спроецировать все действующие силы на ось, параллельную оси симметрии паза центрифуги (см. рис. 3), то получится следующее выражение:

$F_ц \cos\alpha - F_c - F_т = 0$.

Подставив в него полученные выражения для сил, получим:

$$\frac{2}{3} \pi^3 d^3 (\rho - \rho_0) n^2 (L \cos\alpha + r) (\cos\alpha - \mu_т \sin\alpha) = \frac{\pi \xi \rho_0 d^2 \varphi^2 L^2}{8\tau^2};$$

$$\tau = \frac{\varphi L}{4\pi n} \sqrt{\frac{3\rho_0 \xi}{d (\rho - \rho_0) (L \cos\alpha + r) (\cos\alpha - \mu_т \sin\alpha)}}, \quad (2)$$

где ρ – плотность частицы, кг/м^3; d – размер частицы, м; n – частота вращения, об/с; L – пройденное расстояние вдоль стенки сосуда, м; r – расстояние от оси вращения до верхней точки оси заполненной части сосуда, м; $\mu_т$ – коэффициент трения частицы о стенку сосуда; α – угол наклона паза для сосуда с суспензией в роторе центрифуги к горизонтальной плоскости (если в центрифуге сосуд подвешивается, то он при вращении становится в горизонтальное положение и α = 0); τ – время прохождения расстояния L, с. Полученное уравнение (2) позволяет рассчитать время прохождения частицей расстояния L при центрифугировании. За это расстояние необходимо принять длину заполненной суспензией части сосуда. Таким образом, время τ будет потрачено частицей на осаждение из самой верхней точки суспензии на дно сосуда; φ – эмпирический поправочный коэффициент на форму частицы (все описанные выше) закономерности соблюдаются в приближении, по которому форма частицы сферическая), умножаемый на скорость ее осаждения (табл. 2).

Таблица 3

Определение режима движения частицы и расчет коэффициента сопротивления

Режим	Критерий режима	ξ
Ламинарный	Re < 2	ξ = 24/Re
Переходный	2 < Re < 500	ξ = 18,5/Re^{0,6}
Турбулентный (автомодельный)	Re > 500	ξ = 0,44

С помощью уравнения (2) можно рассчитать серию пар значений "частота–время" и подобрать оптимальную пару. Неопределенным остается значение коэффициента сопротивления ξ. Его значение зависит от режима движения частицы. Безразмерными критериями режима служат уже упомянутый критерий Рейнольдса (Re) и критерий Архимеда (Ar). Значение последнего рассчитывается по формуле

$$Ar = \frac{d^3 \rho_0 g (\rho - \rho_0)}{\mu^2}, \quad (3)$$

где μ – динамическая вязкость среды, Па · с; g – ускорение свободного падения, равное 9,8 м/с^2. Критерий Рейнольдса является более точным критерием режима, поскольку при его расчете можно учесть так называемую стесненность осаждения, т. е. влияние соседних частиц на осаждение данной. Для этого существует полуэмпирическое соотношение:

$$Re = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6\sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}}, \quad (4)$$

где ε – объемная доля жидкой фазы в суспензии. Ее можно рассчитать, зная плотность частицы, жидкости и процентное содержание твердой фазы ω:

$$\varepsilon = \frac{(100 - \omega) \rho}{(100 - \omega) \rho_0 + \omega\rho} \cdot (5)$$

Также ее можно рассчитать через плотность суспензии ρ_c, плотность жидкости и процентное содержание твердой фазы:

$$\varepsilon = \frac{(1 - \omega / 100) \rho_c}{\rho_0}. \quad (6)$$

Рассчитав значение критерия Рейнольдса по уравнению (4), можно определить режим движения частицы и, исходя из него, коэффициент сопротивления ξ (табл. 3).

Готовый файл Microsoft Excel для расчета. Для удобства пользования полученными соотношениями и алгоритмом расчета автором создан готовый файл Microsoft Excel. Его можно скачать в интернете по ссылке: http://narod.ru/disk/23242899001/fuge.xls.html. Чтобы воспользоваться файлом для расчета, нужно разрешить макросы в настройках Excel, поскольку расчет выполняется через макрос, которым является программа, написанная в приложении VBA. Затем необходимо ввести заготовленные исходные данные в ячейки на пересечении первой строки и разных столбцов листа 1 файла Excel в соответствии с табл. 4.

- Плотность и динамическая вязкость дисперсионной среды, которая чаще всего является водой. Плотность и вязкость воды зависят от температуры (табл. 5).
- Угол наклона паза ротора центрифуги к горизонтальной плоскости α. Значение можно найти в описании центрифуги, источниках литературы, либо измерить, вставив в паз какой-нибудь длинный предмет (например, карандаш, ручку, стеклянную палочку) и горизонтально приложив к этому предмету транспортир. Если сосуд в центрифуге подвешивается (например, в центрифугах типа Beckman), при вращении под действием центробежной силы сосуд принимает горизонтальное положение, поэтому этот угол равен нулю.

Таблица 4

Порядок ввода исходных данных в ячейки первой строки файла Excel

Возможные варианты обозначения столбца		Величина	Единица измерения
B	2	Размер частицы: множитель (например, если он равен $2,5 \cdot 10^{-5}$ м, то ввести 2,5)	м
D	4	Размер частицы: обратный порядок (например, если он равен $2,5 \cdot 10^{-5}$ м, то ввести 5)	
F	6	Плотность частиц (если известна, в противном случае ячейка должна быть пустой)	кг/м^3
H	8	Плотность жидкости (например, воды)	кг/м^3
J	10	Динамическая вязкость жидкости	мПа · с (сПз)
L	12	Угол наклона паза ротора центрифуги к горизонтальной плоскости α	градусы
N	14	Коэффициент трения	–
P	16	Длина столба суспензии	см
R	18	Поправочный коэффициент φ	–
T	20	Процентное содержание твердой фазы	%
V	22	Плотность суспензии (если неизвестна плотность частиц; в противном случае ячейка должна быть пустой)	кг/м^3
X	24	Расстояние от оси вращения до верхней точки оси заполненной части сосуда	см

Примечание. Прочерк – безразмерная величина.

● Коэффициент трения скольжения частиц о стенку сосуда с суспензией. Значение выбирается в интервале от 0,1 до 0,2 в зависимости от материалов частицы и стенки. Если оба материала гидрофильные или оба гидрофобные, то значение нужно выбрать ближе к 0,2; если один материал гидрофилен, а другой – гидрофобен, то ближе к 0,1. Так или иначе, вклад этой величины в точность расчета небольшой. Если угол α равен нулю, то коэффициент трения выбирать не нужно [см. формулу (2)].

Таблица 5

Плотность и вязкость воды в зависимости от температуры [2]

Показатель	Температура, °С					
	0	20	40	60	80	100
Плотность, кг/см^3	1000	998	992	983	972	958
Динамическая вязкость, мПа · с (сПз)	1,79	1,00	0,656	0,469	0,357	0,284

● Высота столба налитой в сосуд суспензии. Измеряется легко с помощью линейки. Как правило, сосуд имеет округлое дно, поэтому для создания небольшого запаса в расчете следует измерять высоту до нижней точки внутренней стенки сосуда.

● Процентное содержание твердой фазы в суспензии ε. При необходимости можно найти в литературе или измерить с помощью спектрофотометра либо фотоэлектроколориметра, воспользовавшись калибровочной кривой или коэффициентом экстинкции для этой или похожей суспензии.

В соответствующую ячейку должно быть введено значение либо плотности частиц, либо плотности суспензии (т. е. обе ячейки не должны быть пустыми).

После этого можно запустить программу, нажав на картинку левой кнопкой мыши. В результате появятся пары значений времени центрифугирования и частоты вращения ротора центрифуги. Наиболее целесообразно выбрать пару значений с меньшим временем и, соответственно, большей частотой. Однако следует учитывать, что частое использование центрифуги на максимальных оборотах уменьшает срок ее правильной и безопасной работы. Выбранное значение времени следует округлить (преимущественно в большую сторону).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Касаткин А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. – 10-е изд. – М.: Альянс, 2005.
2. *Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов. – 11-е изд. – М.: РусМедиаКонсалт, 2004.
3. *Фролов Ю. Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. – 3-е изд. – М.: Альянс, 2004.
4. *Яворский Б. М., Пинский А. А.* Основы физики. Т. 1. – 2-е изд. – М.: Наука, 1974.

Поступила 30.06.11