

# Отечественные фотоотверждаемые акрилатные клеи для герметизации микрофлюидных чипов из полиметилметакрилата

## Domestic photo-cured acrylate glues for adhesive bonding microfluidic chips from polymethyl methacrylate

Т.А. ЛУКАШЕНКО, А.Н. ЗУБИК, А.Л. БУЛЯНИЦА, Г.Е. РУДНИЦКАЯ

T.A. LUKASHENKO, A.N. ZUBIK, A.L. BULYANITSA, G.E. RUDNITSKAYA

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), Санкт-Петербург, Россия

Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia  
tal\_72@bk.ru

Показано, что клеевые соединения микрофлюидных чипов из полиметилметакрилата, герметизированные отечественными клеями SM Chemie 301 и SM Chemie 700, выдерживают давление до 0,3 МПа (1 час), а также динамические нагрузки, возникающие при многократном изменении температуры от 60 до 95°C. Указанные клеи не ингибируют полимеразную цепную реакцию, и их можно рекомендовать для герметизации микрофлюидных чипов для этого метода молекулярной диагностики.

**Ключевые слова:** клей, клеевое соединение, полимеразная цепная реакция, микрофлюидный чип, полиметилметакрилат

It is shown that the adhesive bonding of microfluidic chips made of polymethylmethacrylate, bonded with domestic glues SM Chemie 301 and SM Chemie 700, withstand pressure up to 0.3 MPa (1 hour), as well as dynamic loads arising from repeated temperature changes from 60 to 95°C. These adhesives do not inhibit the polymerase chain reaction and can be recommended for bonding microfluidic chips for this method of molecular diagnostics.

**Keywords:** glue, adhesive bonding, polymerase chain reaction, microfluidic chip, polymethylmethacrylate

DOI: 10.35164/0554-2901-2022-11-12-47-50

### Введение

В последние годы стали весьма востребованы миниатюрные устройства (микрофлюидные чипы и/или картриджи) для молекулярной диагностики [1, 2, 3]. Количественная полимеразная цепная реакция в реальном времени (ПЦР-РВ) является наиболее распространенным методом молекулярной диагностики. Эта реакция проходит при повышенной температуре, при этом важно сохранить герметичность микроструктур, чтобы избежать испарения реагентов.

Ранее в ИАП РАН была разработана технология герметизации микрочипов путем введения клея в технологический зазор между каналом канализированной (содержащей микроструктуры – каналы, реакционные камеры и т.п.) и защитной пластинами за счет действия капиллярных сил [4, 5]. Особенностью клеевого соединения является наличие между деталями клеевого слоя, который в случае микрочипа является частью стенки его реакционной камеры и контактирует с реакционной смесью, поэтому проверка влияния клея на реализуемую в микрочипе реакцию является необходимой. Проведение ПЦР в микрочипе также предполагает воздействие на клеевое соединение динамических нагрузок, вызванных многократным циклическим (от 25 до 50 циклов) нагреванием и охлаждением от 60 до 95°C, поэтому качество герметизации микрочипов также необходимо проверять. При изготовлении микрочипов из полиметилметакрилата (ПММА) нами успешно применялся акрилатный фотоотверждаемый клей средней вязкости Permabond® UV630 (Engineering Adhesives) производства Великобритании [6]. Нами было установлено, что Permabond® UV630 не ингибирует ПЦР-РВ [7]. Задачей данной работы является исследование применимости отечественных аналогов клея Permabond® UV630 – однокомпонентных фотоотверждаемых акрилатных клеев фирм SM Chemie и ООО «Мастикс» для герметизации полимерных микрочипов, предназначенных для ПЦР-РВ.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования были выбраны однокомпонентные фотоотверждаемые акрилатные клеевые составы российского происхождения:

- клей SM Chemie 301 (SM Chemie) разработан для склеивания оргстекла (ПММА), имеет адгезию к поликарбонату (ПК), его вязкость (90–170 сПз), предел прочности на разрыв (20 МПа) и удлинение при разрыве (280%) сопоставимы с характеристиками применяемого нами в настоящее время для герметизации микрочипов зарубежного аналога Permabond® UV630 (соответственно 200–300 сПз, 14 МПа и 110%) [8];

- клей SM Chemie 700 (SM Chemie) характеризуется низкой вязкостью (16–20 сПз), разработан для запаивания швов, используемых при производстве упаковки из полиэтилентерефталата (ПЭТФ), подходит для работы со стеклом. Характеристики прочности клеевого соединения производителем не указаны, а удлинение при разрыве составляет 400% [9];

- клей MastixUV (ООО «Мастикс») представляет собой смесь акриловых и метакриловых эфиров спиртов С7–С16 (до 80%) с добавками загустителя (до 5%) и фотоинициатора (до 1%) (ТУ 2257-024-90192380-2012), разработан для склеивания стекла со стеклом, пластиком, металлом, деревом и т.п. Характеристики прочности клеевого соединения и удлинение при разрыве производителем не указаны [10].

В качестве конструкционных материалов были использованы следующие марки ПММА (г. Дзержинск):

- пластифицированный блочный полимер метилметакрилата ТОСП® (ГОСТ 17622–72, ТУ 2216-271-05757593–2001);

- непластифицированный блочный полимер метилметакрилата ТОСН (ГОСТ 17622–72, ТУ 2216-271-05757593–2001);

- экструзионный пластичный акриловый полимер АCRYMA®72\* (ТУ 2216-030-55856863–2004).

Образцы клеевых соединений (каждый образец состоял из двух пластин ПММА размером 24×24 мм, толщиной 1 мм) и микрочипы изготавливали путем ввода клея в технологический зазор между соединяемыми деталями и последующего отверждения при помощи ртутной лампы ДРШ-250 в течение 20 мин по описанной в [5] методике.

\* Перед использованием пластины ПММА АCRYMA®72 отжигали при температуре 80°C не менее двух часов.

Качество образцов клеевых соединений проверяли путем выдерживания в условиях температурного режима проведения ПЦР (термоциклирования): предварительный прогрев до 95°C в течение 5 мин; затем 40 циклов нагрева-охлаждения (с 95 до 60°C с продолжительностью 20 и 60 сек соответственно). Температурный режим обеспечивали термочипером SwiftMaxPro (ESCO, Сингапур). Качество соединительного шва клевого соединения оценивали визуально. Критерием работоспособности клевого соединения является сохранение его качества, т.е. сохранение целостности (отсутствие разрушений), прозрачности и однородности клевого шва (отсутствие признаков старения) после термоциклирования.

Основное требование к герметичности микрочипов для ПЦР состоит в сохранении объема введенной в реакционные камеры жидкости в процессе термоциклирования. Качество герметизации микрочипов проверяли гравиметрическим методом, описанным в [4]. Микрочип считался герметичным и выдержавшим испытание, если убыль его массы после термоциклирования по отношению к массе введенной в реакционную камеру жидкости (с учетом поправки на влагопоглощение) не превышала 5%.

Герметичность микрочипов также контролировали путем подачи в реакционные камеры избыточного давления воздуха 3 атм (0,3 МПа) и выдерживания под давлением в течение 1 часа. Образец считался герметичным, если за это время не происходило разгерметизации микрочипа и резкого снижения давления.

Образцы для исследования влияния компонентов клея на ПЦР-РВ изготавливали путем дозирования капель неотвержденного клея лабораторным дозатором на фторопластовую подложку и последующим их отверждением при помощи ртутной лампы ДРШ-250 в течение 20 мин. Затем выдерживали отвержденные образцы не менее недели при комнатной температуре для удаления летучих соединений. И далее отбирали отвержденные кусочки клея в виде шаровых сегментов массой  $3,0 \pm 0,5$  мг. После чего каждый образец отвержденного клея помещали в пробирку емкостью 0,2 мл и добавляли 25 мкл готовой смеси для ПЦР-РВ. Среднюю величину порогового цикла ( $C_t$ ) определяли с применением программного обеспечения прибора АНК-32 (ИАП РАН) по трем-пяти пробиркам. Увеличение порогового цикла на одну единицу соответствует двукратному уменьшению производительности реакции, поэтому при разности +1,0 и более между  $C_t$  в пробирках с образцами материалов и в пробирках без добавок считалось, что материал ингибирует реакцию.

Массу измеряли на аналитических весах САРТОГОСМ СЕ224-С специального класса точности (ГОСТ Р 53228). Предел допускаемой погрешности в измеряемом интервале взвешивания составлял  $\pm 0,5$  мг.

#### Результаты и обсуждение

Предварительные эксперименты показали, что образцы клеевых соединений из ПММА различных марок, изготовленные с помощью клеевых составов SM Chemie 301, SM Chemie 700 и MastixUV (пары ACRYMA®72/ACRYMA®72, ТОСП®/ТОСП®, ТОСН/ТОСН), сохранили работоспособность после термоциклирования – признаков старения и разрушения в области их клеевых швов не замечено.

Для проверки на герметичность при избыточном давлении были изготовлены многокамерные микрочипы, описанные ранее в [5] (материал канализированной и защитной пластин – ПММА ТОСН, глубина микроструктур 300 мкм, площадь соединения деталей составляла 11 см<sup>2</sup>).

Для проверки на герметичность гравиметрическим методом при помощи выбранных клеев были герметизированы трехслойные микрочипы следующей конструкции (рис. 1): нижний слой – пластина ПММА ТОСП® размером 60×24 мм, толщиной 1 мм. Средний слой – пластина ПММА ТОСП® размером 60×24 мм, толщиной 1 мм, в которой просверлено три сквозных отверстия диаметром 8 мм. Верхний (защитный) слой состоит из трех пластин ПММА ACRYMA®72 размером 13×13 мм, толщиной 1 мм, в каждой из которых просверлено два отверстия диаметром 1 мм (для ввода пробы). Площадь клевого соединения деталей между нижней и средней пластинами равна 13 см<sup>2</sup>, а между средней и верхними пластинами – 3 см<sup>2</sup>.

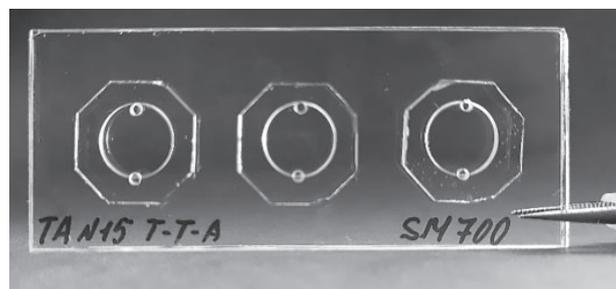


Рис. 1. Трехкамерный микрочип для проверки на герметичность гравиметрическим методом.

Согласно расчету по уравнению состояния реальных газов, при нагревании герметично заклеенных микрочипов (не заполненных жидкостью) от 20 до 95°C происходит увеличение давления воздуха в реакционных камерах до 1,3 атм (0,13 МПа). Реальный микрочип работает в условиях расширения жидкости в реакционной камере, поэтому клеевое соединение может испытывать повышенные нагрузки. Увеличение объема жидкости может проходить по различным схемам с принципиально разным влиянием на состояние клевого слоя и границ раздела (клеевой слой/поверхностный слой полимера). В частности, увеличение объема жидкости может приводить к уходу ее части во входной и выходной каналы практически без деформации полимерного материала чипа и клеевой прослойки.

Другой из вариантов – равномерное увеличение размеров жидкости во всех направлениях. Самый критичный для клевого соединения вариант – увеличение объема пробы исключительно в вертикальной плоскости и без деформации элементов (канализированная и защитная пластины) полимерного чипа. При такой схеме произойдет максимальное из всех возможных продольное растяжение клевого слоя. Собственно схема деформации чипа при температурном расширении жидкости требует отдельного изучения и выходит за рамки нашей статьи. В данной работе оценка деформации клевого слоя выполнена при выборе самого негативного варианта, приводящего к максимальному его растяжению.

Реакционную смесь для ПЦР-РВ можно приближенно представить водоподобной жидкостью. Из множества физических характеристик будет использован только объемный температурный коэффициент расширения. Его принимаем равным соответствующему значению для воды. Этот коэффициент зависит от температуры. В частности, для диапазона 20–40°C он равен  $3,02 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , для 60–80°C имеет большее значение, а именно –  $5,87 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . При расчете объемного расширения слоя жидкости надо учесть изменение коэффициента объемного расширения при увеличении температуры. Линейная аппроксимация температурной зависимости объемного коэффициента расширения воды [11] имеет вид:  $(1,33 + 0,070 \cdot T) \cdot 10^{-4}$ , где  $T$  – температура в градусах Цельсия. Достоверность аппроксимации очень высокая (коэффициент детерминации превышает 0,997). Тогда при изменении температуры от 60 до 95°C относительное увеличение объема водоподобной жидкости составит около 2,4%.

Поскольку средняя толщина клевого слоя микрочипов, изготовленных из различных марок ПММА, при введении клея в технологический зазор между деталями за счет капиллярных сил колеблется от 19 до 75 мкм [5], для расчета можно принять среднюю толщину клевого слоя 50 мкм. Если глубина реакционной камеры 300 мкм, то в рассматриваемом случае ее увеличение по высоте примерно равно 7,2 мкм. Таким образом, относительное растяжение клевого слоя составит 14,4%. Если глубина камеры составляет 1000 мкм (описанные выше трехкамерные чипы, рис. 1), а клеевая прослойка присутствует в верхней и в нижней части реакционной камеры для соединения канализированной пластины с защитной и нижней пластинами, и увеличение объема жидкости осуществляется только за счет расширения камеры в вертикальной плоскости, то на слой клея 50 мкм (верхний и нижний) приходится суммарное абсолютное удлинение 24 мкм или 24% по отношению к суммарной толщине клеевых слоев. По сравнению с указанными производителями с предельно допустимыми относительными удлинениями 280% (SM Chemie 301) и 400% (SM Chemie 700), рассчитанные значения многократно меньше. При других схемах расширения реакционной смеси удлинение клевого слоя будет еще меньшим.

**Таблица 1. Результаты проверки на герметичность микрочипов из ПММА\*, герметизированных при помощи отечественных клеев SM Chemie 301, SM Chemie 700 и MastixUV (гравиметрический метод).**

№	Среднее значение массы введенной в чип дистиллированной воды, мг	Оценка убыли массы воды после термоциклирования чипа**, мг		Комментарий
		мг	%	
Чипы, склеенные клеем SM 301				
1	197,3 ± 0,3 (n = 3)	2,4 ± 0,2	1,2 ± 0,1	герметично
2	200,0 ± 0,3 (n = 3)	2,4 ± 0,2	1,2 ± 0,1	герметично
3	196,7 ± 0,3 (n = 3)	3,1 ± 0,2	1,6 ± 0,1	герметично
Чипы, склеенные клеем SM 700				
4	190,9 ± 0,3 (n = 3)	3,4 ± 0,2	1,8 ± 0,1	герметично
5	192,8 ± 0,3 (n = 3)	2,8 ± 0,2	1,5 ± 0,1	герметично
6	190,9 ± 0,3 (n = 3)	2,9 ± 0,2	1,5 ± 0,1	герметично
Чипы, склеенные клеем MastixUV				
7	200,9 ± 0,3 (n = 3)	3,1 ± 0,2	1,5 ± 0,1	герметично
8	196,2 ± 0,3 (n = 3)	3,1 ± 0,2	1,6 ± 0,1	герметично
9	196,0 ± 0,3 (n = 3)	2,0 ± 0,2	1,0 ± 0,1	герметично

\* Конструкционные материалы микрочипов – ПММА ТОСП® и ПММА АCRYMA®72; площадь клевого соединения ТОСП®/ ТОСП® равна 13 см<sup>2</sup>; площадь клевого соединения ТОСП®/ АCRYMA®72 равна 3 см<sup>2</sup>.  
 \*\* Оценка изменения массы чипа (до и после термоциклирования) на основе усредненных по пяти–семи измерениям значений.

Однако режим термоциклирования при проведении ПЦР предполагает воздействие на клевое соединение динамических нагрузок. Для таких условий принято полагать, что неразрушающими являются нагрузки, не превышающие 1–2% от предельно допустимых [12]. Таким образом, можно принять, что при эксплуатации микрочипов с клеями SM Chemie допустимыми являются нагрузки, не превышающие 6–8%. Поскольку расчетные значения удлинения при разрыве превышают оценочные для клеев SM Chemie, а характеристики клея MastixUV не указаны производителем, необходимо провести экспериментальную проверку качества герметизации микрочипов.

Микрочипы, герметизированные клеевыми составами SM Chemie 301 (один чип) и SM Chemie 700 (один чип), прошли проверку на герметичность в условиях статических нагрузок – выдержали избыточное давление 3 атм (0,3 МПа) в течение 1 часа. Для проведения испытаний на герметичность гравиметрическим методом было изготовлено по три микрочипа с использованием каждого клея. По итогам испытаний все микрочипы были признаны герметичными (таблица 1). Таким образом, все исследуемые клеевые составы MastixUV, SM Chemie 301, SM Chemie 700 подходят для склеивания микрочипов из ПММА марок ТОСП® и АCRYMA®72.

Однако дальнейшие исследования показали, что клей MastixUV нельзя рекомендовать для герметизации чипов для ПЦР-РВ, поскольку клей полностью ингибирует данную реакцию (таблица 2). Повторные эксперименты с образцами клея меньшей массы (1,0 ± 0,5) мг и, соответственно, имеющими меньший объем и

площадь, с которой компоненты клея могут переходить в раствор, также подтвердили, что клей MastixUV ингибирует ПЦР.

Результаты опытов по проверке влияния компонентов клеев SM Chemie 301 и SM Chemie 700 на ПЦР-РВ представлены в таблице 3. Разница ΔCt находится в пределах погрешности определения порогового цикла, следовательно, они не оказывают влияния на реакцию. Поэтому клеи SM Chemie 301 и SM Chemie 700 можно рекомендовать для герметизации микрочипов, предназначенных для полимеразной цепной реакции.

Таким образом, и по механическим свойствам, и по отсутствию эффекта влияния на полимеразную цепную реакцию, отечественные клеи SM Chemie 301 и SM Chemie 700 подходят для герметизации микрофлюидных чипов для ПЦР-РВ, изготовленных из ПММА. Клей MastixUV пригоден для герметизации микрочипов из ПММА, работающих в условиях термоциклирования, однако его нельзя рекомендовать для изготовления предназначенных для ПЦР микрочипов, поскольку он ингибирует данную реакцию.

*Заключение*

В работе показано, что, помимо декларированных производителем адгезионных свойств, клей SM Chemie 700 подходит для склеивания экструзионного и блочного (литого) ПММА. Механические свойства клеев SM Chemie 301, SM Chemie 700 и MastixUV позволяют клеевым соединениям (ТОСП®/ТОСП® и ТОСП®/ АCRYMA®72) микрочипов из ПММА работать в условиях динамических нагрузок, вызванных многократным циклическим (от 25 до 50 циклов) нагреванием и охлаждением от 60°C до 95°C при

**Таблица 2. Влияние добавленных отвержденных образцов клея MastixUV на ПЦР-РВ при различных концентрациях ДНК-мишени.**

Длительность хранения образцов клея	C <sub>t</sub> x, цикл ПЦР-РВ (ПЦР-смесь с образцами клея)	C <sub>t</sub> 0, цикл ПЦР-РВ (ПЦР-смесь без образцов клея)	ΔCt, цикл ПЦР-РВ
масса образцов (3,0 ± 0,2) мг при добавлении ДНК мишени 8000 копий / мкл			
10 суток (1,5 недели)	> 50 (n = 3)	25,3 ± 0,1 (n = 5)	полностью ингибирует
масса образцов (1,0 ± 0,1) мг при добавлении ДНК мишени 8000 копий / мкл			
8 суток (1 неделя)	27,0 ± 0,1 (n = 4)	25,5 ± 0,1 (n = 5)	+1,7 ингибирует

**Таблица 3. Влияние добавленных отвержденных образцов клея SM Chemie на ПЦР-РВ при различных концентрациях ДНК-мишени.**

Клей	Длительность хранения образцов клея	C <sub>t</sub> x, цикл ПЦР-РВ (ПЦР-смесь с образцами клея)	C <sub>t</sub> 0, цикл ПЦР-РВ (ПЦР-смесь без образцов клея)	ΔCt, цикл ПЦР-РВ
при концентрации 8000 копий/мкл				
SM Chemie301	2 недели	25,4 ± 0,1 (n = 5)	25,4 ± 0,2	0,0
	5 месяцев	25,3 ± 0,2 (n = 5)		-0,2
SM Chemie700	2 недели	25,5 ± 0,1 (n = 5)	(n = 5)	+0,1
	5 месяцев	25,5 ± 0,1 (n = 5)		+0,1
при концентрации 80 копий/мкл				
SM Chemie301	3 недели	32,0 ± 0,1 (n = 3)	32,1±0,2	+0,1
	5 месяцев	32,1 ± 0,2 (n = 3)		0,0
SM Chemie700	3недели	32,5 ± 0,2 (n = 3)	(n = 4)	-0,4
	5 месяцев	32,0 ± 0,2 (n = 3)		+0,1

проведении полимеразной цепной реакции. По одному микрочипу из пластин ПММА (ТОСН/ТОСН), герметизированному клеем SM Chemie 301 и клеем SM Chemie 700 соответственно, прошли проверку на герметичность в условиях статических нагрузок – выдержали избыточное давление 3 атм (0,3 МПа) в течение часа.

Установлено, что отвержденные образцы клеев SM Chemie 301 и SM Chemie 700 не оказывают негативного влияния на ПЦР-РВ, в то время как образцы клея MastixUV при таких же условиях ингибируют эту реакцию.

Таким образом, отечественные фотоотверждаемые акрилатные клеи SM Chemie 301 и SM Chemie 700 можно рекомендовать в качестве альтернативы импортному клею Permabond® UV630 для герметизации микрочипов из ПММА, предназначенных для проведения количественной полимеразной цепной реакции в реальном времени.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00761-22-00, тема «Микрофлюидные устройства с интегрированными функциональными микро- и наноразмерными структурами для биологических и медицинских исследований», шифр FFZM-2022-0012.

### Литература

1. Harpaldas H., Arumugam S., Campillo Rodriguez C., Kumar B.A., Shi V., Sia S.K. Point-of-care diagnostics: recent developments in a pandemic age // *Lab on a Chip*. – 2021. – Vol. 21, No23. – P. 4517–4548. – DOI: 10.1039/d1lc00627d.
2. Yang J., Brooks C., Estes M., Hurth C., Zenhausem F. An integratable microfluidic cartridge for forensic swab samples lysis // *Forensic Science International: Genetics*. – 2014. – Vol. 8. – P. 147–158. – DOI: 10.1016/j.fsigen.2013.08.012.
3. Chen D., Mauk M., Qiu X. et al. An integrated, self-contained microfluidic cassette for isolation, amplification, and detection of nucleic acids // *Biomedical Microdevices*. – 2010. – Vol. 12, No4. – P. 705–719. – DOI: 10.1007/s10544-010-9423-4.
4. Лукашенко Т.А., Тупик А.Н., Рудницкая Г.Е., Буляница А.Л., Цымбалов А.И., Евстапов А.А. Способы спекания, склеивания и химической сварки растворителем при изготовлении полимерных и полимер-стеклянных микрочиповых устройств // *Научное приборостроение*. – 2016. – Т. 26, No2. – С. 64–74. – DOI: 10.18358/np-26-2-i6474.
5. Лукашенко Т.А., Зубик А.Н., Буляница А.Л., Евстапов А.А. Особенности неразъемного клевого соединения деталей микрофлюидных устройств из полиметилметакрилата // *Клеи. Герметики. Технологии*. – 2020. – No11. – С. 23–28. – DOI: 10.31044/1813-7008-2020-0-11-23-28.
6. Permabond UV630 – клей, отверждаемый УФ-облучением / ООО «Пермабонд Рус». [Москва, 2007–2022]. URL: <https://permabond.ru/catalog/uf/Permabond-UV630.htm> (дата обращения: 03.06.2022).
7. Тупик А.Н., Рудницкая Г.Е., Лукашенко Т.А., Евстапов А.А. Исследование влияния материала микрофлюидного чипа на полимеразную цепную реакцию // *Журнал технической физики*. – 2020. – Т. 90, No9. – С. 1574–1580. – DOI: 10.21883/JTF.2020.09.49692.436-19
8. Mastix – Клей для стекла UV однокомпонентный, фотоотверждаемый / ООО «Мастикс». [МО, г. Шелково, 2022]. URL: <http://mastiks.ru/catalog/klei-i-germetiki/klej-dlya-stekla-uv-odnokomponentnyj-fotootverzhdaemyj> (дата обращения: 03.06.2022).
9. SM 301 УФ клей SM Chemie для оргстекла / ООО «СМ ХЕМИ». [Москва, 2022]. URL: <https://smchemie.ru/SMChemie301> (дата обращения: 03.06.2022).
10. SM 700 УФ клей SM Chemie для ПЭТ / ООО «СМ ХЕМИ». [Москва, 2022]. URL: <https://smchemie.ru/SMChemie700> (дата обращения: 03.06.2022).
11. Расширительные баки для отопления – расчет объема воды при нагревании / ООО «Веста регионы». [Москва, 2022]. URL: [https://valtec.ru/document/article/rasshiritelnye\\_baki.html](https://valtec.ru/document/article/rasshiritelnye_baki.html) (дата обращения: 03.06.2022).
12. Вильнав Ж.Ж. Клеевые соединения. М.: Техносфера, 2007. 384 с.